

**ETUDE D'EVALUATION DES IMPACTS
DE L'OUVERTURE D'UNE EMBOUCHURE
ARTIFICIELLE A L'AVAL DE ST-LOUIS
SUR LE BARRAGE DE DIAMA**

**Modélisation numérique du fleuve Sénégal
à l'aval du barrage de Diama**

Mai 2005

Rapport 11476 RP 03



COYNE ET BELLIER

Bureau d'Ingénieurs Conseils

**ETUDE D'EVALUATION DES IMPACTS
DE L'OUVERTURE D'UNE EMBOUCHURE
ARTIFICIELLE A L'AVAL DE ST-LOUIS
SUR LE BARRAGE DE DIAMA**

**Modélisation numérique du fleuve Sénégal
à l'aval
du barrage de Diama**

Rapport 11476 RP 03

A	24/05/05	Première émission	G. MILESI	A. LARA	B. MAYEUR
Révision	Date	Sujet de la révision	Rédaction	Contrôle	Approbation

S O M M A I R E

Page

LISTE DES FIGURES

1.	OBJET DU RAPPORT	1
2.	DONNÉES DE BASE	2
2.1.	Base topo-bathymétrique	2
2.2.	Coefficients de rugosité théoriques	3
2.3.	Historique des niveaux mesurés	3
2.4.	Historique des débits relâchés à Dama	4
2.4.1.	Données brutes	4
2.4.2.	Corrélation niveau-débit	5
2.5.	Conditions aux limites des modèles numériques	5
3.	MODELE NUMÉRIQUE 1D	6
3.1.	Fondements théoriques de la modélisation 1D	6
3.2.	Construction du modèle 1D	7
3.3.	Calage et validation du modèle 1D en régime permanent	7
3.4.	Simulation d'épisodes réels en transitoire	8
3.5.	Ecoulements en lit majeur	12

4.	MODELE NUMERIQUE 2D	13
4.1.	Fondements théoriques de la modélisation 2D	13
4.2.	Construction du modèle 2D	13
4.3.	Calage du modèle 2D	14
4.4.	Calculs des lignes d'eau en régime permanent entre Diama et S ^t Louis	15
4.5.	Comparaison de résultats de modèles 1D et 2D	16
5.	EXTRAPOLATION DIRECTE DES MESURES	17
5.1.	Méthodologie	17
5.2.	Calage des paramètres	18
5.3.	Résultats	18
6.	SYNTHÈSE	19

LISTE DES FIGURES

- Figure 2-1** Limnigramme à l'aval immédiat du barrage de Diama – nov. 2000 à déc. 2004 (mesures Thalimèdes)
- Figure 2-2** Limnigrammes à Saint-Louis (hydrobase et Pont Faidherbe) de nov. 2000 à déc. 2004 (mesures Thalimèdes)
- Figure 2-3** Limnigrammes aval et amont au barrage de Diama – janv. 2003 à déc. 2004 (mesures aux échelles)
- Figure 2-4** Limnigrammes Diama aval - Corrélation Thalimèdes et mesures à l'échelle limnimétrique – janv. 2003 à déc. 2004
- Figure 2-5** Débits relâchés au barrage de Diama, janvier 2003 à décembre 2004
- Figure 2-6** Débits relâchés au barrage de Diama, janvier 1987 à décembre 2004 (source Hydraccess)
- Figure 2-7** Niveaux d'eau à Saint-Louis en fonction du débit relâché à Diama – Période janvier 2003 – décembre 2004 (*mesures Thalimèdes*)
- Figure 2-8** Perte de charge entre Diama et Saint-Louis en fonction du débit relâché à Diama – Période janvier 2003 – décembre 2004 (*mesures Thalimèdes*)
- Figure 2-9** Extrapolation des ZSL jusqu'à Q_{Diama} égal à $6\,600\text{ m}^3/\text{s}$
- Figure 3-1** Modèle 1D – Localisation des profils en travers
- Figure 3-2** Modèle 1D – Profil en long du fleuve Sénégal de Diama à Saint-Louis
- Figure 3-3** Modèle 1D – Z_{Diama} du 09 au 16.02.03
- Figure 3-4** Modèle 1D – Z_{Diama} du 27 au 29.11.03
- Figure 3-5** Modèle 1D – Z_{Diama} du 20 au 23.07.03 – Sensibilité au K_s
- Figure 3-6** Modèle 1D – Z_{Diama} du 20 au 23.07.03 – Sensibilité à Q_{Diama}
- Figure 3-7** Modèle 1D – Z_{Diama} du 20 au 23.07.03 – Sensibilité à Z_{SL}
- Figure 4-1** Modèle 2D – Maillage et topographie de la zone d'étude
- Figure 4-2** Niveaux d'eau (*m IGN*) – Modèle 2D pour $Q = 6\,600\text{ m}^3/\text{s}$
- Figure 4-3** Vitesse (*m/s*) – Modèle 2D pour $Q = 6\,600\text{ m}^3/\text{s}$
- Figure 4-4** Vecteurs vitesses – Modèle 2D pour $Q = 6\,600\text{ m}^3/\text{s}$
- Figure 5-1** Courbe de tarage aval de Diama – Extrapolation des mesures
- Figure 5-2** Perte de charge entre Diama et Saint-Louis – Extrapolation des mesures
- Figure 6-1** Comparaison des courbes de tarage aval de Diama
- Figure 6-2** Courbe de tarage aval de Diama retenue comme condition limite des essais sur modèles physiques

1. OBJET DU RAPPORT

Le présent rapport est remis à l'OMVS (*Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal*) par le consultant Coyne et Bellier dans le cadre du Contrat d'étude signé par les deux parties en juin 2004, ayant pour objet l'étude d'évaluation des impacts de l'ouverture d'une embouchure artificielle (*ci-après dénommée « la brèche »*) à l'aval de Saint-Louis sur le barrage de Diama.

Il fait suite :

- au rapport 11476 RP 01A du 27/08/2004, intitulé «Recommandations relatives à l'exploitation du barrage de Diama pendant l'hivernage 2004»,
- au rapport 11476 RP 02A du 25/02/2005, intitulé «Rapport relatif aux levés bathymétriques».

L'ouverture d'une brèche artificielle dans la langue de Barbarie à 7 km en aval de la ville de Saint-Louis, en octobre 2003, a modifié les conditions d'écoulement du fleuve Sénégal depuis l'ancienne embouchure naturelle jusqu'au pied aval du barrage de Diama (*26 km en amont de Saint-Louis*). Au niveau de Diama, les deux effets principaux constatés sont un abaissement du niveau moyen aval et une sensibilité accrue du niveau aval à l'effet des marées.

Une des conséquences de cette modification des niveaux à l'aval de Diama est une augmentation de l'énergie dissipée au barrage, du fait de l'augmentation de la hauteur de chute résultant de l'abaissement du niveau aval. Le corollaire de ceci est que la règle de gestion actuellement en vigueur⁽¹⁾ imposant le respect d'une valeur limite de l'énergie dissipée à 1000 m⁴/s ne peut plus être respectée à la lettre ou, si elle l'était, donnerait lieu à un abaissement non souhaité du niveau d'eau à l'amont.

La modélisation hydraulique numérique du fleuve à l'aval de Diama, objet du présent rapport, permet d'estimer les niveaux d'eau à l'aval du barrage, pour les forts débits allant jusqu'à la crue de projet du barrage (6 600 m³/s) et sous les nouvelles conditions d'écoulement, afin de fournir les conditions aux limites pour les essais sur modèles physiques (rapport 11476 RP 04A).

Pour cela trois méthodes ont été employées : modélisation aux éléments finis unidimensionnelle puis bidimensionnelle, et extrapolation directe des mesures de niveaux réalisées in situ depuis l'ouverture de la brèche.

Les deux autres rapports fournis au titre du présent contrat sont :

- le rapport 11476 RP 04 relatif à la modélisation physique du barrage de Diama,
- le rapport final numéroté 11476 RP 05.

(1) Cf. Manuel de gestion du barrage de Diama, IRD, 22 juin 2004

2. DONNEES DE BASE

2.1. Base topo-bathymétrique

- La topo-bathymétrie du modèle le long du lit mineur (*voir les relevés détaillés dans le rapport 11476 RP 02*) est définie :
 - entre le barrage de Diama et le Pont Faidherbe de Saint-Louis, par 42 profils en travers relevés par l'IRD en novembre 2004 dans le cadre du présent Contrat complétés aux abords du Djeuss (*affluent en rive gauche*) par 1 profil relevé par l'IRD en novembre 2001 (*bathymétrie du fleuve où la navigation est possible, extrapolée jusqu'aux rives difficiles d'accès – cotes maximales relevées comprises entre 0 et + 0,5 m IGN*),
 - entre le pont Faidherbe et l'ancienne embouchure naturelle : à partir des relevés bathymétriques relevés en 2001 par Sogreah : bathymétrie du fleuve navigable (*cotes maximales relevées inférieures à - 2 m IGN*) extrapolées jusqu'aux rives à l'aide des cartes IGN au 1/50 000,
 - au niveau de la nouvelle brèche à partir des relevés bathymétriques effectués par l'IRD le 30 juin 2004.
- La topographie du modèle en lit majeur est définie :
 - à partir des images satellites des 16/11/97, 13/10/98, et 3/10/99 pour la définition des contours du lit majeur,
 - à partir de l'analyse des mesures de hauteurs d'eau à *Diama* (*Cf. chapitre 2.3 et figure 2.1*) : la cote moyenne du lit majeur a été estimée égale à une valeur comprise entre +0,7 et +1,0 m IGN. En effet, pour des hauteurs d'eau à Saint-Louis supérieures à cette cote, l'influence de la marée se fait moins sentir (*variation de la ligne d'eau avec la marée moins importante*) ce qui laisse à penser que les écoulements sortent alors du lit mineur pour venir inonder la plaine qui se comporte comme un bassin tampon,
 - puis par calage du modèle hydraulique numérique bidimensionnel pour ajuster cette cote.

Les petits cours d'eau, dont l'influence est négligeable, ne sont pas modélisés. Seul le Gueyeloubé, défluent principal du fleuve Sénégal entre Diama et Saint-Louis, a été modélisé sur le modèle 2D à partir des profils en travers relevés par l'IRD en novembre 2001 (*18 profils*) et novembre 2004 (*2 profils*).

2.2. Coefficients de rugosité théoriques

Plusieurs références sont disponibles dans la littérature pour estimer le coefficient de Strickler (*coefficient K_s exprimé en $m^{1/3}/s$*) dans les cours d'eau naturels, nous en citons plusieurs ci-dessous :

➤ **En lit mineur**

- d'après Ven Te Chow : $30 < K_s < 35$ « canal en terre excavé dans un sol alluvionnaire limoneux avec fond de sable et petites végétations » à « cours d'eau naturel, pentes irrégulières, fond régulier, sections peu variable », (Cf. p.120 de l'ouvrage Open Channel Hydraulics de V.T. Chow).
- d'après Pardé : $43 < K_s < 45$ pour les « cours d'eau peu turbulents avec pentes faibles, fond de sable et de boue », (Cf. p.495 de l'ouvrage Hydraulique générale de A. Lancastre).
- d'après le Cemagref (*Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement*) : $25 < K_s < 40$ pour "les grands cours d'eau à section régulière sans broussailles".

➤ **En lit majeur**

- d'après Cowan (Cf. p. 494 de l'ouvrage Hydraulique générale de A. Lancastre) $K_S = 12$ (avec $a = 1$, $n_0 = 0,020$, $n_1 = 0,005$, $n_2 = 0$, $n_3 = 0,010$, $n_4 = 0,05$),
- d'après le CEMAGREF, $K_S = 15$, pour "les plaines d'inondation avec broussailles et quelques arbres en hiver".

D'où les plages de variation possibles du coefficient de Strickler :

- en lit mineur : $25 < K_s < 45 \text{ m}^{1/3}/s$,
- en lit majeur : $12 < K_s < 15 \text{ m}^{1/3}/s$.

2.3. Historique des niveaux mesurés

Les mesures de niveaux utilisées dans la présente étude proviennent de deux sources :

- de l'IRD, centre de Dakar Hann : niveaux mesurés et enregistrés à Diama aval, Saint-Louis et l'hydrobase par des appareils de type « Thalimèdes » ; le Thalimèdes est un codeur limnimétrique à flotteur de marque OTT qui mesure en continu le niveau d'eau et possède un enregistreur intégré ;
- de la SOGED, exploitant du barrage de Diama : lectures des échelles limnimétriques amont et aval du barrage.

Les hauteurs d'eau enregistrées par le Thalimèdes aval du barrage de Diama sont disponibles au pas de temps de 30 minutes depuis novembre 2000. On constate une baisse

des niveaux d'eau à l'aval du barrage de Dama et une sensibilité accrue de ces niveaux à l'effet des marées suite à l'ouverture de la brèche le 3/10/03.

Les hauteurs d'eau enregistrées par le Thalimèdes de Saint-Louis situé au niveau du pont Faidherbe sont disponibles au pas de temps de 30 minutes depuis septembre 2000. Elles sont échantillonnées au-dessous de la cote $-0,25$ m IGN, le Thalimèdes étant hors d'eau (Cf. *figure 2.2*). Ce phénomène se produit à chaque cycle de marée en période d'étiage depuis l'ouverture de la brèche qui a causé un abaissement généralisé des niveaux.

Les hauteurs d'eau enregistrées par le Thalimèdes de l'hydrobase sont disponibles au pas de temps de 30 minutes depuis juillet 2004 (Cf. *figure 2.2*). Ce Thalimèdes a été installé à cette date pour pallier l'incapacité du Thalimèdes du pont Faidherbe à mesurer des niveaux inférieurs à $-0,25$ m IGN.

Les hauteurs d'eau mesurées sur les échelles limnimétriques amont et aval du barrage de Dama ont été mises à notre disposition par la SOGED pour les années 2003 et 2004 (voir *figure 2.3*). Une mesure journalière est disponible en période d'exploitation normale et une à dix mesures journalières sont disponibles en période de crue. Les mesures des niveaux d'eau à l'aval du barrage de Dama à la fois enregistrées par le Thalimèdes et lues sur l'échelle limnimétrique par l'exploitant du barrage (SOGED), sont dans l'ensemble bien corrélées (Cf. *figure 2.4*). Les écarts entre ces 2 moyens de mesures sont en moyenne inférieurs à 10 cm avec un écart type inférieur à 15 cm.

2.4. Historique des débits relâchés à Dama

2.4.1. Données brutes

Les débits relâchés au barrage de Dama sont actuellement calculés d'après la courbe d'étalonnage des vannes en écoulement noyé, établie par l'IRD (cf. "Rapport POGR – Manuel de gestion du barrage de Dama", 2001) :

$$Q = f1(H_m - H_v, P) = 1,0566 * E(P) * N * L * (2 * g * (H_m - H_v))^{0,3761}$$

où

Q	: débit lâché instantané (m^3/s)
E	: ouverture verticale de vanne (m)
P	: palier de réglage des vannes
L	: largeur de vanne (= 20 m)
g	: accélération de la pesanteur (= $9,81 \text{ m/s}^2$)
H _m	: niveau instantané de plan d'eau amont (m)
H _v	: niveau instantané de plan d'eau aval (m)
N	: nombre de vannes ouvertes.

Les débits calculés de janvier 2003 à décembre 2004 à partir des données fournies par l'exploitant du barrage (SOGED), sont présentés sur la figure 2.5. en annexe. Les débits maximum observés sont restés inférieurs à $2400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les débits extraits de la base de données Hydraccess de janvier 1987 à août 2004 sont également présentés sur la figure 2.6. en annexe. Ces débits sont des débits moyens journaliers non représentatifs des variations journalières de débits (*dues en particulier à l'influence de la marée*).

2.4.2. Corrélation niveau-débit

Les figures 2.7. et 2.8. en annexe présentent les niveaux d'eau à St Louis et les pertes de charge entre Diama et Saint-Louis en fonction du débit relâché au barrage de Diama pour la période de janvier 2003 à décembre 2004. Durant cette période les débits n'ont pas dépassé 2 400 m³/s.

Un extrapolation des niveaux d'eau moyens observés à St Louis a été faite pour des débits atteignant 6 600 m³/s (*crue de projet*). La loi d'extrapolation retenue est la suivante (cf. figure 2.9) :

$$Z_{SL} = 0,24 \frac{Q_D}{1000}$$

avec Z_{SL} = niveaux d'eau moyen à St Louis (m IGN)
 Q_D = débits relâchés au barrage de Diama (m³/s)

2.5. Conditions aux limites des modèles numériques

Les niveaux d'eau mesurés sur le Thalimèdes de Saint-Louis et les débits relâchés à Diama constituent respectivement les conditions aux limites aval et amont des modèles numériques 1D et 2D présentés dans la suite du présent rapport.

3. MODELE NUMERIQUE 1D

3.1. Fondements théoriques de la modélisation 1D

Le logiciel de modélisation hydraulique utilisé est le logiciel MIKE 11, développé par le Danish Hydraulic Institute.

Le logiciel résout les équations de Barré de Saint Venant (*Cf. ci-dessous*) en régime transitoire et en monodimensionnel pour tout type de réseau hydrographique (*filaire, ramifié, maillé*) par la méthode des différences finies.

Equations de Barré de Saint-Venant :

$$\text{Equation de continuité} \quad \frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = q$$

$$\text{Equation de quantité de mouvement} \quad \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta(\alpha Q^2 / A)}{\delta x} + gA \frac{\delta H}{\delta x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

où H est la hauteur d'eau,
 Q le débit,
 α le coefficient de vitesse (*ou de Coriolis*),
 t le temps,
 x la position,
 q apport latéral,
 R rayon hydraulique,
 C le coefficient de Chézy,
 A la section mouillée,
 g l'accélération de la pesanteur.

En régime permanent et uniforme, les débits peuvent être exprimés par l'équation de Manning-Strickler :

$$Q = K_s \cdot S \cdot R h^{2/3} \cdot \sqrt{\partial H / \partial L}$$

où Q débit (m³/s),
 Ks coefficient de Strickler (m^{1/3}/s),
 S section mouillée (m²),
 Rh rayon hydraulique (m),
 $\partial H / \partial L$ perte de charge par unité de longueur (sans unité).

3.2. Construction du modèle 1D

Seul le lit mineur du fleuve Sénégal entre Diama et Saint-Louis a été modélisé dans cette première étape. Les 43 profils en travers (Cf. §.2.1.) utilisés sont localisés sur la vue en plan (figure 3.1.) et sur le profil en long du modèle (figure 3.2.).

3.3. Calage et validation du modèle 1D en régime permanent

L'objectif est de caler les écoulements en lit mineur entre Diama et Saint-Louis par rapport aux données (*hauteurs, débits en fonction du niveau de marée à Saint-Louis*) relevées depuis l'ouverture de la brèche.

Les mesures disponibles sont (Cf. §.2.3 à 2.5) :

- les niveaux à Diama et à Saint-Louis (*Thalimèdes*),
- les débits relâchés à Diama.

Le paramètre de calage est le coefficient de Strickler en lit mineur (Cf. §.2.2).

Le processus de calage consiste à imposer un niveau à Saint-Louis et un débit à Diama comme conditions aux limites du modèle, et à ajuster le coefficient de Strickler de manière à reproduire le plus fidèlement possible le niveau d'eau mesuré à Diama.

Le calage a été réalisé en régime permanent pour un débit relâché à Diama de 1000 m³/s qui correspond après ouverture de la brèche à un niveau moyen à Saint-Louis de 0,24 m IGN (Cf. figure 2.7). Après ajustement, le coefficient de Strickler retenu est de 45 m^{1/3}/s, il correspond à la limite haute de la plage de variation possible de Ks pour ce type de cours d'eau.

Le choix de ce coefficient a été validé pour les débits de 500 et 1 500 m³/s (*limite supérieure des écoulements en lit mineur après ouverture de la brèche*). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Conditions aux limites du modèle		Niveaux mesurés		Niveaux calculés	
Q _D	Z _{SL}	Z _D -Z _{SL}	Z _D	Z _D -Z _{SL}	Z _D
500	0,12	0,05	0,17	0,07	0,19
1 000	0,24	0,21	0,45	0,26	0,50
1 500	0,37	0,33	0,70	0,42	0,79

Q_D : débit moyen relâché du barrage de Diama (m³/s)
 Z_D : Niveau d'eau moyen à l'aval de Diama (m IGN)
 Z_{SL} : Niveau d'eau moyen à Saint-Louis (m IGN)
 Z_D - Z_{SL} : Perte de charge (m)

Les niveaux d'eau calculés à Diama ont tendance à être supérieurs à ceux mesurés : de 2 à 9 cm pour des débits variant de 500 à 1500 m³/s. Ces écarts peuvent en partie s'expliquer par :

- l'influence des défluent qui ne sont pas modélisés à ce stade (baisse des niveaux d'eau d'1 cm pour un débit moyen de 965 m³/s si l'on prend en compte le Gueyeloubé, Cf. §.3.4. p.20),
- d'éventuels débordements localisés du fleuve Sénégal en lit majeur, non modélisés,
- d'éventuelles pertes par infiltration dans les nappes.

Dans ces conditions, on conclut que pour un coefficient de Strickler de **45 m^{1/3}/s**, le modèle numérique 1D permet de reproduire avec une précision satisfaisante la courbe de tarage aval de Diama en lit mineur.

3.4. Simulation d'épisodes réels en transitoire

Après calage et validation du modèle en régime permanent, trois périodes réelles représentatives des écoulements en lit mineur ont été simulées en régime transitoire :

- du 09 au 17/02/03 (*débit nul relâché à Diama*),
- du 27 au 29/11/03 (*débit relâché à Diama variant de 171 à 829 m³/s autour d'une moyenne de 283 m³/s*),
- du 20 au 23/07/03 (*débit relâché à Diama variant de 946 à 978 m³/s autour d'une moyenne de 965 m³/s*).

Les débits initiaux ont été pris égaux tout au long du bief aux débits initiaux mesurés à Diama.

Les hauteurs initiales ont été prises égales tout au long du bief aux hauteurs mesurées à Saint-Louis.

Les conditions limites amont et aval du modèle sont respectivement l'hydrogramme aval à Diama ($Q_D(t)$) et le limnigramme à Saint-Louis ($Z_{SL}(t)$) mesurés pour chacune des périodes.

Le tableau récapitulatif des conditions limites et initiales du modèle pour chacune des périodes est présenté ci-après :

<i>Périodes</i>	<i>CL amont</i> $Q_D(t)$	<i>CL aval</i> $Z_{SL}(t)$	<i>Q initial</i>	<i>Z initial</i>
09 au 17/02/03	$Q_{\text{moy}} = 0$	$Z_{\text{moy}} = +0,01$	0	-0,06
27 au 29/11/03	$Q_{\text{moy}} = 283$	$Z_{\text{moy}} = +0,16$	218	-0,25
20 au 23/07/03	$Q_{\text{moy}} = 965$	$Z_{\text{moy}} = +0,69$	950	+0,70

- QD_{moy} : débit moyen relâché au barrage de Dama pendant la période considérée (m^3/s)
- ZSL_{moy} : niveau d'eau moyen à Saint-Louis pendant la période considérée (m IGN)
- Q_{initial} : débit initial tout au long du bief (m^3/s)
- Z_{initial} : niveau d'eau initial tout au long du bief (m IGN)

Les débits considérés sont tels que l'écoulement se fait uniquement en lit mineur.

En premier lieu, le coefficient de Strickler K_S utilisé est donc celui retenu lors de la phase de calage en régime permanent ($K_S=45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$).

Cependant, les hydrogrammes à Dama calculés sur le modèle numérique ne reproduisant pas exactement ceux mesurés dans la réalité, les coefficients de Strickler de 35 et 70 ont également été testés.

Pour la troisième période (*correspondant à un débit moyen de $965 \text{ m}^3/\text{s}$*), nous avons également testé, pour un coefficient de Strickler de $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, les débits à Dama, puis les hauteurs d'eau à Saint-Louis permettant de reproduire l'hydrogramme mesuré à Dama.

Pour chacune des trois périodes, les résultats sont représentés sous la forme de limnigrammes calculés à l'aval immédiat du barrage de Dama (courbe $H=f(t)$) en fonction des débits amont et limnigrammes aval imposés (voir les figures 3.3 à 3.7 ci-après).

Les 2 tableaux ci-dessous synthétisent les résultats de chacune des simulations (tableau 1) et les écarts moyens et maximum entre les mesures de niveaux in situ et les niveaux calculés pour un coefficient de Strickler de $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ sur l'ensemble de chaque période (tableau 2).

Tableau de synthèse des résultats

Période	Conditions aux limites imposées		Niveaux calculés											
			Niveaux mesurés		Ks 35		Ks 45		Ks 70		Ks 45 et 60%.Q _D		Ks 45 et Z _{SL} - 15 cm	
	Q _D	Z _{SL}	Z _D	Z _D -Z _{SL}	Z _D	Z _D -Z _{SL}	Z _D	Z _D -Z _{SL}	Z _D	Z _D -Z _{SL}	Z _D	Z _D -Z _{SL}	Z _D	Z _D -Z _{SL}
20-23/07/03	965	+0,69	+0,77	+0,09	-	-	+0,90	+0,21	+0,77	+0,08	+0,76	+0,07	+0,75	+0,06
27-29/11/03	283	+0,18	+0,26	+0,09	+0,27	+0,09	+0,24	+0,06	+0,21	+0,03	-	-	-	-
09-17/02/03	0	-0,01	-0,04	-0,04	-0,01	0,00	-0,01	0,00	-0,01	0,00	-	-	-	-

Ecart entre niveaux mesurés in situ et niveaux calculés pour Ks=45 m^{1/3}/s

Période	Q _D	Niveaux mesurés	Niveaux mesurés - calculés	
		Z _D	Moyenne	Ecart maxi
20-23/07/03	965	+0,77	-0,14	-0,17
27-29/11/03	283	+0,26	+0,02	-0,36
09-17/02/03	0	-0,04	-0,04	-0,15

- Q_D : débit moyen relâché du barrage de Diama (m³/s)
- Z_D : Niveau d'eau moyen à l'aval de Diama (m IGN)
- Z_{SL} : Niveau d'eau moyen à Saint-Louis (m IGN)
- Z_D - Z_{SL} : Perte de charge (m)

➤ **Période du 20 au 23/07/03 (Q_{moyen} = 965 m³/s)**

Les niveaux d'eau calculés à Diama pour Ks=45 m^{1/3}/s sont supérieurs de 13 cm à ceux mesurés dans la réalité, soit des pertes de charge entre Diama et Saint-Louis plus de 2 fois supérieures.

Afin d'écarter la possible influence des affluents du fleuve Sénégal, le Gueyeloubé a été modélisé, mais les résultats obtenus montrent bien que son influence est négligeable : la différence de niveaux d'eau à Diama avec ou sans considération du Gueyeloubé est inférieure à 1 cm.

Le coefficient de Strickler (Ks 35 et Ks 70) a ensuite été ajusté afin d'étudier la sensibilité des résultats à ce paramètre et tenter de reproduire l'hydrogramme mesuré à Diama.

Un coefficient de Strickler de 70 m^{1/3}/s est nécessaire pour reproduire les écoulements mesurés. Or cette valeur n'est pas acceptable, elle caractérise en effet des rugosités beaucoup plus faibles telles que celles des canaux en béton.

Ceci pourrait s'expliquer soit :

1. par une définition incorrecte des profils en travers du fleuve (*les "sections"*),
 2. par une mauvaise évaluation du débit (*calculé à partir des hauteurs amont et aval du barrage de Dama et de l'ouverture des vannes, à l'aide de la loi d'étalement des vannes établie par l'IRD (Cf. § 3.4.3.)*),
 3. par une mauvaise représentativité des mesures du niveau d'eau à Saint-Louis et/ou à Dama aval.
1. L'hypothèse d'une erreur sur la définition des sections peut être écartée. En effet ces dernières ont été mesurées avec suffisamment de précision à l'occasion d'une campagne spécifique de levés bathymétriques (*Cf. rapport de campagne bathymétrique de février 2005 n° 11476 RP 02/A*) et sont corrélées par d'autres données bathymétriques, notamment par les levés effectués par l'IRD entre Dama et Saint-Louis en novembre et décembre 2001.
 2. L'hypothèse d'une erreur dans l'évaluation des débits peut par contre être envisagée : erreur de mesure des niveaux amont et/ou aval à Dama, et/ou erreur de relevé par l'exploitant du nombre de vannes ouvertes et/ou du palier d'ouverture. Par exemple, un calcul du débit en faisant l'hypothèse que les 7 vannes sont ouvertes alors que seules 6 vannes (*respectivement 5*) le sont, conduit à une surestimation du débit de 17 % (*respectivement 40 %*). La figure 10 montre que pour les mêmes niveaux d'eau mesurés, les débits à Dama devraient être réduits de 40 % pour reproduire sur le modèle les lignes d'eau mesurées (avec un coefficient de Strickler de 45).
 3. L'hypothèse d'une mauvaise représentativité des mesures des niveaux d'eau à Saint-Louis et/ou à Dama aval peut également être envisagée : erreur de calage du zéro des Thalimèdes ou écart entre le niveau mesuré ponctuellement et le niveau moyen du plan d'eau sur toute la section du fleuve (*par exemple sous l'effet du vent*). La figure 11 montre que pour les mêmes débits mesurés à Dama, un abaissement des niveaux d'eau à Saint-Louis de 15 cm est nécessaire pour reproduire sur le modèle les niveaux mesurés à Dama aval (avec un coefficient de Strickler de 45).

➤ **Période du 27 au 29/11/03 ($Q_{\text{moyen}} = 283 \text{ m}^3/\text{s}$)**

Le niveau moyen à Dama est bien reproduit pour $K_s=45$. Seules les amplitudes de variation entre marée basse et marée haute sont trop faibles (*de l'ordre de 3 cm trop bas à marée haute et 15 cm trop haut à marée basse*). Ceci peut s'expliquer par un phénomène de résonance au niveau du barrage de Dama (*amplification de l'amplitude de la marée stoppée par la présence du barrage dans sa remontée du fleuve*). Plus le coefficient de Strickler est élevé, plus la ligne d'eau calculée à Dama est abaissée : pour $K_s=35$, la ligne d'eau est mieux reproduite à marée haute mais moins bien à marée basse et réciproquement pour $K_s=70$.

➤ **Période du 09 au 17/02/2003 ($Q_{\text{moyen}} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$)**

A marée basse, les niveaux calculés à Dama sont 4 à 10 cm trop hauts par rapport à ceux observés. A marée haute, la ligne d'eau à Dama est bien reproduite les 4 premiers jours, les 4 jours suivants les niveaux sont ensuite 2 à 15 cm trop hauts par rapport à ceux observés.

Là encore, la difficulté à reproduire les lignes d'eau à marée basse peut probablement s'expliquer par un phénomène de résonance.

De plus, le débit à Dama étant nul sur la période de simulation, le niveau d'eau moyen à Dama devrait être égal au niveau d'eau moyen à Saint-Louis. Ceci est bien représenté sur le modèle mais n'est pas corroboré par les mesures.

CONCLUSION

Le modèle numérique unidimensionnel avec un coefficient de Strickler de $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ en lit mineur permet de reproduire avec une précision satisfaisante la courbe de tarage aval moyenne à Dama.

Toutefois, les 3 simulations réalisées en transitoire sur des périodes réelles montrent que les niveaux à Dama peuvent s'écarter sensiblement du modèle en raison d'une mauvaise évaluation du débit relâché à Dama et/ou d'une mauvaise représentativité des mesures du niveau d'eau à Saint-Louis et/ou à Dama aval.

3.5. Ecoulements en lit majeur

La modélisation des écoulements en lit majeur dans un modèle 1D se fait traditionnellement par compartimentation de la plaine inondable en « casiers » et traitement des échanges entre lit mineur et lit majeur.

Dans le cas présent, nous avons préféré passer à un modèle 2D, qui permet de résoudre plus efficacement ce type de problème, en se basant sur les résultats du modèle 1D (*en particulier pour le calage du coefficient de Strickler en lit mineur*).

4. MODELE NUMERIQUE 2D

4.1. Fondements théoriques de la modélisation 2D

Le logiciel de modélisation hydraulique utilisé est le logiciel SMS (*Surface Modeling System développé par la Brigham Young University*).

Le modèle SMS est basé sur la résolution des équations intégrées sur la hauteur (*les vitesses cartésiennes horizontales u et v représentent donc les vitesses moyennées sur la hauteur d'eau*) des équations de conservation de la masse et des moments. En négligeant les effets éoliens et les effets des forces de Coriolis, ces équations sont de la forme :

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gun^2}{h^{1/3}} + (u^2 + v^2)^{1/2} = 0$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gvn^2}{h^{1/3}} + (u^2 + v^2)^{1/2} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

où :

h	: Tirant d'eau ;
u, v	: Vitesses cartésiennes ;
x, y, t	: Coordonnées cartésiennes et temps ;
ρ	: densité de l'eau ;
E	: Viscosité d'Eddy ;
g	: gravité ;
a	: élévation du fond ;
n	: coefficient de Manning.

Ces équations sont intégrées à partir des conditions aux limites du modèle, en général en débit ou en niveau d'eau.

4.2. Construction du modèle 2D

Le maillage du domaine d'étude a été réalisé en détaillant plus particulièrement les zones irrégulières (*confluences, changement de direction des écoulements...*).

Les éléments quadrangulaires quadratiques ont été privilégiés dans le lit mineur. Les éléments triangulaires quadratiques ont été utilisés en lit majeurs.

La figure 4.1. illustre le maillage et la topographie retenus.

4.3. Calage du modèle 2D

L'objectif est de caler les écoulements en lit mineur et majeur entre Diama et Saint-Louis par rapport aux données (*hauteurs, débits en fonction du niveau de marée à Saint-Louis*) mesurées.

Le processus de calage consiste à imposer une hauteur d'eau réelle à Saint-Louis et un débit réel à Diama comme conditions aux limites du modèle, et à ajuster les paramètres de calage de manière à reproduire la hauteur d'eau mesurée à Diama.

Les mesures disponibles sont :

- les niveaux à Diama et à Saint-Louis (Cf. § 2.4),
- les débits à Diama (Cf. § 2.4).

Le coefficient de Strickler en lit mineur a déjà été calé sur le modèle 1D ($K_s = 45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$). Les seuls paramètres de calage restants sont donc le coefficient de Strickler en lit majeur et la cote topographique moyenne du lit majeur (Cf. § 2.1).

Le calage a été réalisé en régime permanent, l'influence de la marée se faisant peu ressentir pour les écoulements en lit majeur.

Aucun écoulement en lit majeur n'ayant été observé depuis l'ouverture de la brèche, le calage s'est effectué par rapports aux mesures antérieures pour les hauteurs et débit suivants :

- Q mesuré Diama = $1555 \text{ m}^3/\text{s}$,
- Z mesuré Saint-Louis = 1,20 m IGN,
- Z mesuré Diama = 1,37 m IGN.

Pour un coefficient de Strickler en lit majeur de $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (*correspondant au coefficient de Strickler le plus fort trouvé dans la littérature pour ce type de cours d'eau, Cf. §.2.2*) et une cote moyenne du lit majeur de +0,70 m IGN, les résultats du calcul donnent une hauteur d'eau à Diama de + 1,38 m IGN soit une perte de charge calculée de 18 cm contre 17 cm mesurés.

Au vu de la précision des calculs recherchés, ces résultats sont jugés satisfaisants.

Les paramètres retenus sont donc :

- en lit mineur : $K_s = 45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$,
- en lit majeur : $K_s = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$,
- cote topographique moyenne du lit majeur : +0,70 m IGN.

4.4. Calculs des lignes d'eau en régime permanent entre Diama et S^t Louis

Les lignes d'eau entre Diama et Saint-Louis ont été calculées pour la plage de débits de 0 à 6600 m³/s (*crue de projet du barrage de Diama*) afin d'évaluer la nouvelle courbe de tarage aval du barrage de Diama.

Les conditions aval et amont du modèle numérique sont respectivement les niveaux d'eau à Saint-Louis résultant de la nouvelle courbe de tarage moyenne (*voir figure 2.7.*) et les débits relâchés à Diama.

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des résultats obtenus :

Conditions aux limites imposées		Niveaux calculés à l'aval de Diama	
Q_D	Z_{SL}	Z_D	$Z_D - Z_{SL}$
500	+0,12	+0,19	0,07
1 000	+0,24	+0,45	0,21
1 500	+0,37	+0,74	0,37
3 000	+0,72	+1,53	0,81
4 000	+0,96	+1,98	1,02
5 000	+1,20	+2,36	1,16
6 600	+1,58	+2,90	1,32

- Q_D : Débit moyen relâché du barrage de Diama (m³/s)
- Z_D : Niveau d'eau moyen à l'aval de Diama (m IGN)
- Z_{SL} : Niveau d'eau moyen à Saint-Louis (m IGN), voir figure 4
- $Z_D - Z_{SL}$: Perte de charge (m)

Les niveaux d'eau, les champs de vitesses et les vecteurs vitesses calculés pour la crue de projet sont présentés sur les figures suivantes.

On peut noter que les pertes de charge sont plus importantes au niveau du barrage de Diama et de Saint-Louis où les sections d'écoulements sont plus étroites.

Les écoulements sont bien évidemment prépondérants dans le lit mineur du fleuve Sénégal où les vitesses peuvent atteindre 2,25 m/s pour la crue de projet (*au niveau de Saint-Louis*). La zone au nord dans la vallée du Thialakt et la zone du Ngalam au sud représentent uniquement des zones de stockage des eaux, les débits y transitant étant négligeables (*vitesses inférieures à 0,04 m/s*).

4.5. Comparaison des résultats des modèles 1D et 2D

Les résultats de la modélisation des écoulements en lit mineur sur les modèles 1D et 2D sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

<i>Conditions aux limites du modèle</i>		<i>Niveaux mesurés</i>		<i>Niveaux calculés Modèle 1D</i>		<i>Niveaux calculés Modèle 2D</i>	
Q_D	Z_{SL}	$Z_D - Z_{SL}$	Z_D	$Z_D - Z_{SL}$	Z_D	$Z_D - Z_{SL}$	Z_D
500	0,12	0,05	0,17	0,07	0,19	0,07	0,19
1 000	0,24	0,21	0,45	0,26	0,50	0,21	0,45
1 500	0,37	0,33	0,70	0,42	0,79	0,37	0,74

- Q_D : débit moyen relâché du barrage de Dama (m^3/s)
- Z_D : Niveau d'eau moyen à l'aval de Dama (m IGN)
- Z_{SL} : Niveau d'eau moyen à Saint-Louis (m IGN)
- $Z_D - Z_{SL}$: Perte de charge (m)

Les niveaux calculés sur le modèle 2D se rapprochent davantage des niveaux mesurés, ce qui confirme l'analyse du § 3.3. et confirme la validité de la modélisation avec un coefficient de Strickler $k_S = 45 m^{1/3}/s$ en lit mineur.

5. EXTRAPOLATION DIRECTE DES MESURES

A titre de comparaison, la nouvelle courbe de tarage aval de Dama a également été estimée, en parallèle de la modélisation numérique, par extrapolation directe des mesures.

5.1. Méthodologie

Le fuseau extrapolé, correspondant aux mesures à marées haute et basse, est caractérisé par les équations suivantes :

- A marée basse (*courbe basse*) :

$$Qb = \left(\frac{Z - Zo}{a} \right)^{1/b}$$

où Qb : débit relâché à Dama à marée basse (m³/s)

Z : niveau aval à Dama (m IGN)

Zo : niveau aval à Dama à marée basse et débit nul

a et b : coefficients à ajuster

- A marée haute (*courbe haute*) :

$$Qh = Qb \times \left(1 - \exp \left[- \frac{(Z - Zh)/(Z - Zo)}{\rho} \right] \right)$$

où Qh : débit relâché à Dama à marée haute (m³/s)

Z : niveau aval à Dama (m IGN)

Zo : niveau aval à Dama à marée basse et débit nul

Zh : niveau aval à Dama à marée haute et débit nul

rho : coefficient à ajuster

5.2. Calage des paramètres

Les paramètres et coefficients utilisés pour les ajustements avant et après ouverture de la brèche sont les suivants :

<i>Paramètres</i>	<i>Avant brèche</i>	<i>Après brèche</i>
Zo	-0,7 m IGN	-1,5 m IGN
Zh	+1,1 m IGN	+0,7 m IGN
a	0,0450	0,0477
b	0,50	0,50
rho	0,154	0,130

5.3. Résultats

Pour la crue de projet ($Q = 6\,600\text{ m}^3/\text{s}$), les niveaux d'eau extrapolés après ouverture de la brèche sont 55 cm plus bas que ceux extrapolés avant ouverture de la brèche (cf. figure 5.1).

Pour une éventuelle brèche située dans une position intermédiaire entre l'ancienne embouchure naturelle et la brèche actuelle, les niveaux à l'aval de Dama se situeraient entre ces 2 fuseaux extrapolés.

La figure 5.2. montre l'extrapolation des pertes de charge entre Dama et Saint-Louis résultant de celles des niveaux d'eau mesurés à Saint-Louis (*figure 2.7.*) et à l'aval de Dama (*figure 5.1.*).

6. SYNTHÈSE

Les tableaux suivants présentent une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus (*niveaux d'eau à l'aval de Diama, tableau 1, et pertes de charge entre Diama et Saint-Louis, tableau 2*) par modélisation numérique et extrapolation directe des mesures.

		<i>Courbe de tarage aval à Diama d'après :</i>				
		<i>Extrapolation directe des mesures</i>			<i>Modèle numérique 1D</i>	<i>Modèle numérique 2D</i>
Q_D	Z_{SL}	$Z_{D \min}$	$Z_{D \text{ moyen}}$	$Z_{D \max}$	$Z_{D \text{ moyen}}$	$Z_{D \text{ moyen}}$
500	0,12	-0,43	0,17	0,77	0,19	0,19
1 000	0,24	0,02	0,45	0,86	0,50	0,45
1 500	0,37	0,36	0,70	0,97	0,79	0,74
3 000	0,72	1,13	1,26	1,38	-	1,53
4 000	0,96	1,54	1,62	1,69	-	1,98
5 000	1,20	1,89	1,95	2,00	-	2,36
6 600	1,58	2,40	2,43	2,47	-	2,90

		<i>Pertes de charge entre Diama et St. Louis d'après :</i>		
		<i>Extrapolation directe des mesures</i>	<i>Modèle numérique 1D</i>	<i>Modèle numérique 2D</i>
Q_D	$Z_D - Z_{SL}$	$Z_D - Z_{SL}$	$Z_D - Z_{SL}$	$Z_D - Z_{SL}$
500	0,05	-	0,07	0,07
1 000	0,21	-	0,26	0,21
1 500	0,33	-	0,42	0,37
3 000		0,54	-	0,81
4 000		0,66	-	1,02
5 000		0,75	-	1,16
6 600		0,85	-	1,32

- Q_D : Débit moyen relâché du barrage de Diama (m^3/s)
- Z_D : Niveau d'eau moyen à l'aval de Diama (m IGN)
- Z_{SL} : Niveau d'eau moyen à Saint-Louis (m IGN)
- $Z_D - Z_{SL}$: Perte de charge entre Diama et Saint-Louis (m)

Les 2 méthodes d'extrapolation de la courbe de tarage aval (*extrapolation directe des mesures et modèle numérique 2D*) donnent des résultats très proches : les niveaux d'eau à l'aval de Diama diffèrent de moins de 50 cm pour le débit correspondant à la crue de projet de Diama ($Q = 6\,600 \text{ m}^3/\text{s}$).

Pour mémoire, la figure 6.1. présente également la courbe de tarage aval de Diama qui avait été calculée par SOGREAH dans le cadre de l'étude d'exécution du barrage de Diama en 1976 (*avant ouverture de la brèche*) : courbe issue d'un modèle mathématique et abaissée de 20 cm par mesures de sécurité.

Les niveaux d'eau calculés à l'aval du barrage de Diama pour la crue de projet de $6\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ sont de l'ordre de +2,4 à +2,9 m IGN avec des vitesses atteignant 2,25 m/s à Saint-Louis pour un niveau d'eau estimé à 1,58 m IGN.

Afin d'étudier sur modèles physiques le risque d'érosion au pied du barrage, on utilisera la courbe de tarage issue de l'extrapolation directe des mesures à marée basse (cf. figure 6.2). Cette courbe fournit en effet des niveaux d'eau plus bas et donc des conditions plus conservatives que celle issue de la modélisation numérique.

Cette courbe de tarage est caractérisée par l'équation suivante (cf. §5.1) :

$$Q_D = \left(\frac{Z_D + 1,5}{0,477} \right)^{1/0,5}$$

où Q_D (m³/s) et Z_D (m IGN) sont respectivement les débits relâchés et les niveaux d'eau à l'aval du barrage de Diama

ANNEXE

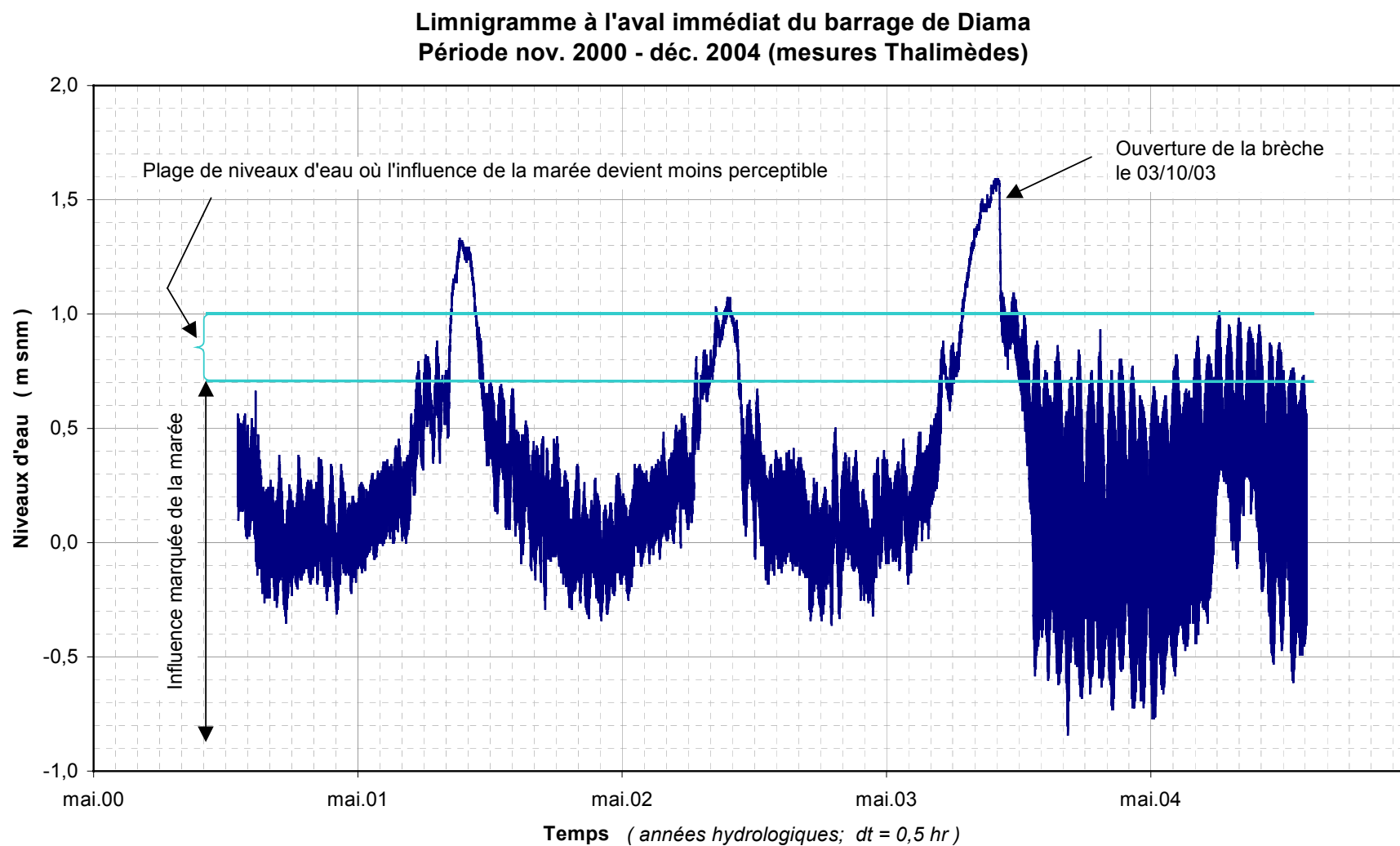


Figure 2-1 : Limnigramme à l'aval immédiat du barrage de Dama – nov. 2000 à déc. 2004 (mesures Thalimèdes)

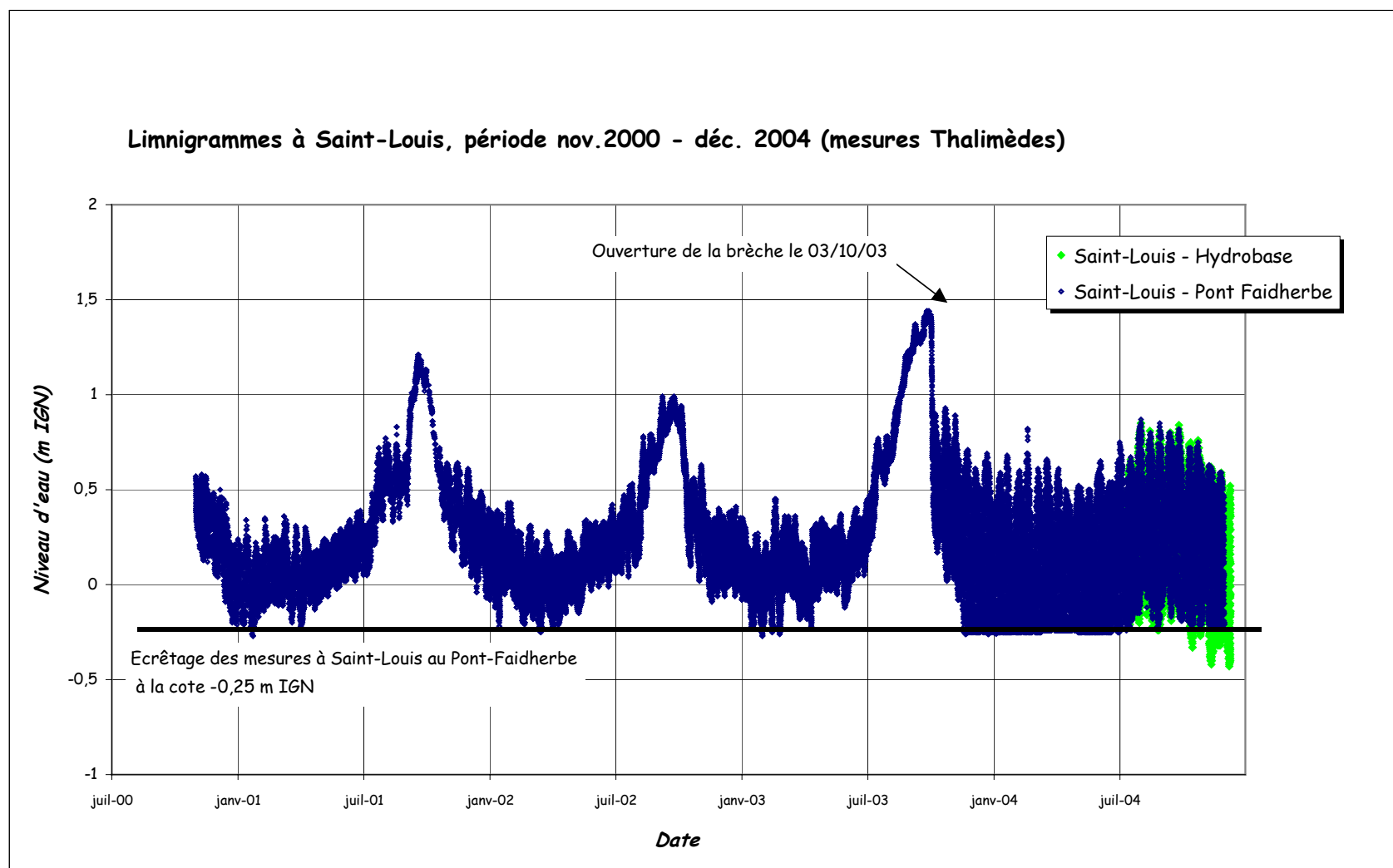


Figure 2-2. : Limnigrammes à Saint-Louis (hydrobase et Pont Faidherbe) - de nov. 2000 à déc. 2004 (mesures Thalimèdes)

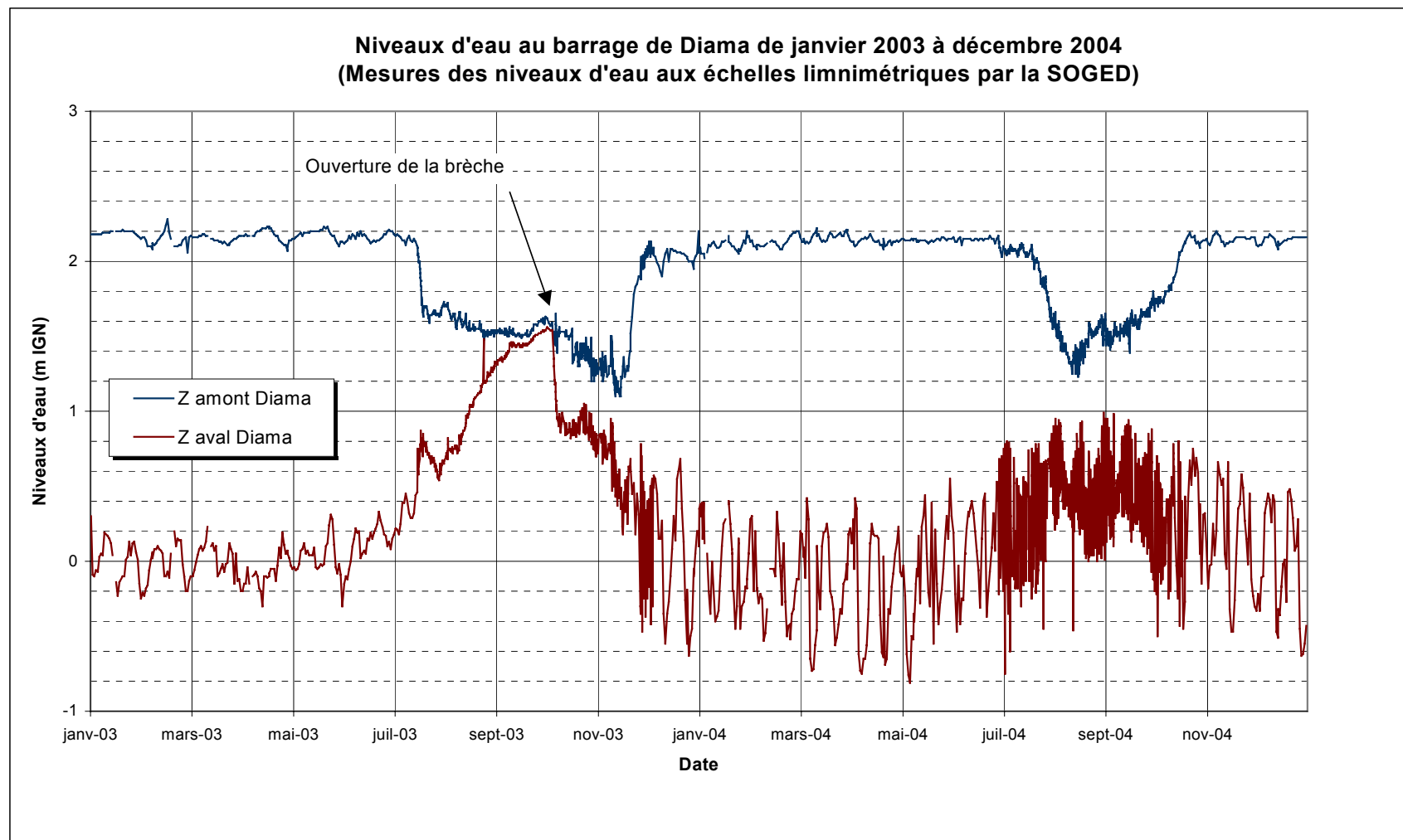


Figure 2-3 : Limnigrammes aval et amont au barrage de Diama – janv. 2003 à déc. 2004 (mesures aux échelles)

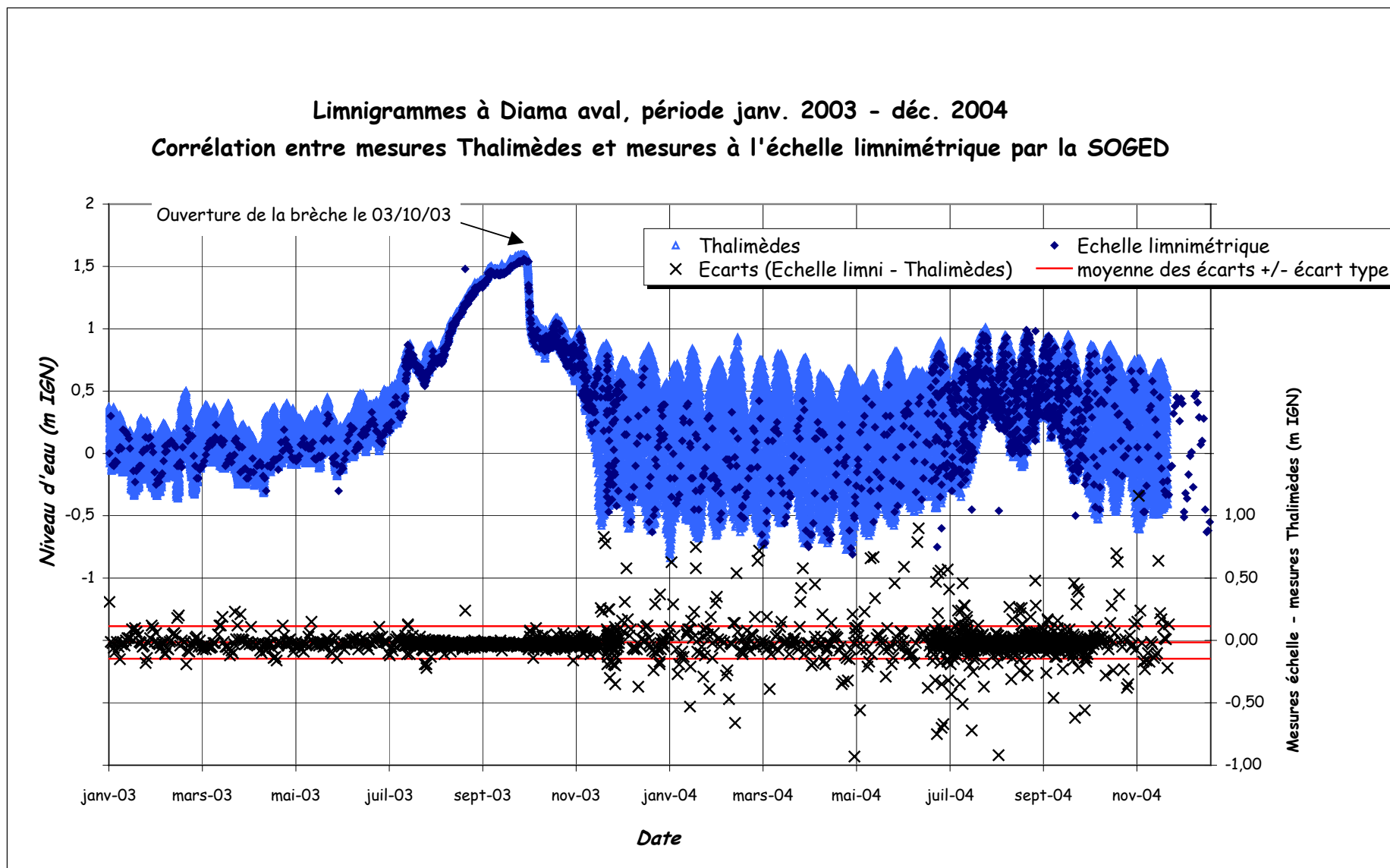
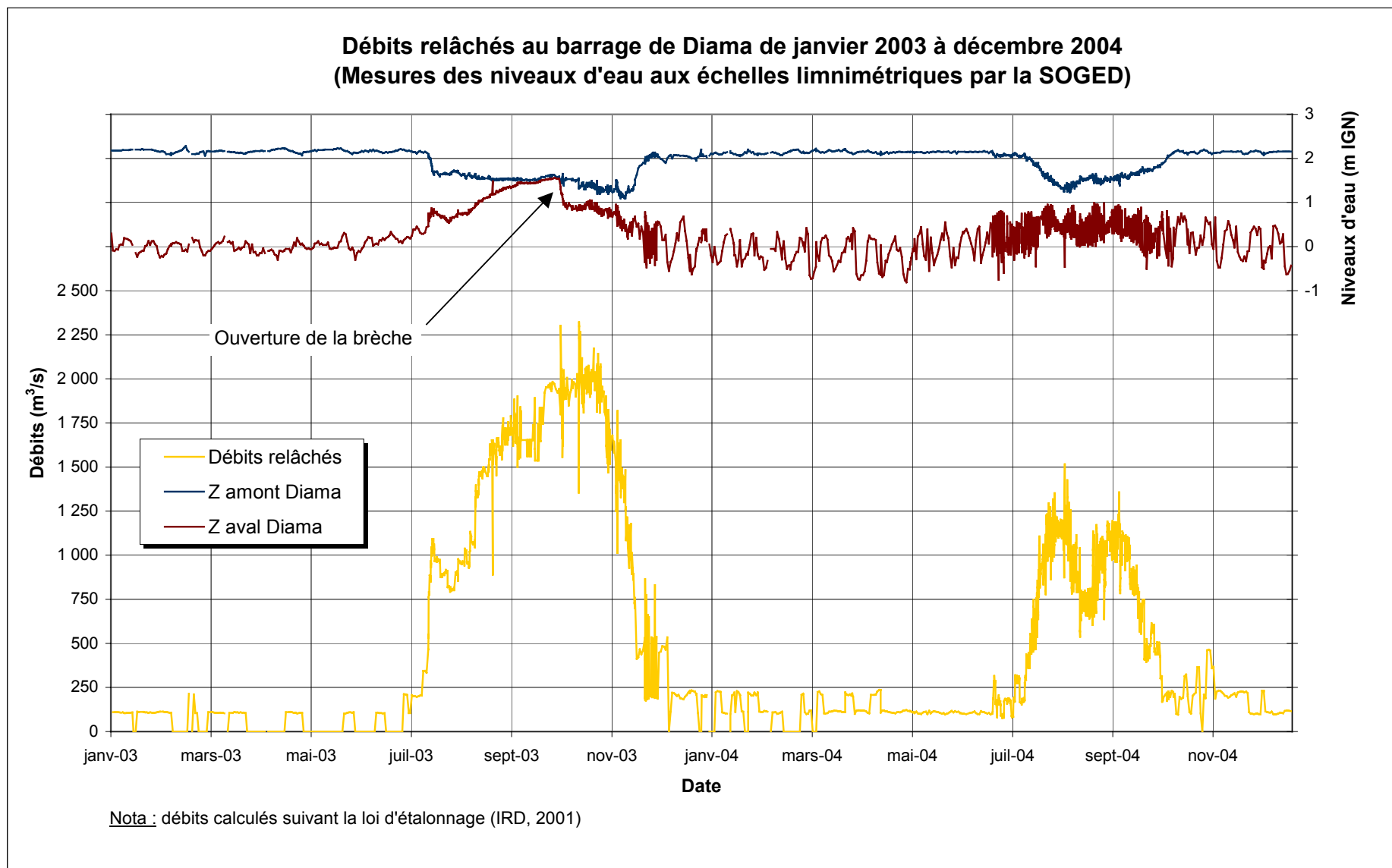


Fig. 2.4. Limnigrammes Diama aval - Corrélation Thalimèdes et mesures à l'échelle limnimétrique - janv. 2003 à déc. 2004

**Fig. 2.5. Débits relâchés au barrage de Diama, janv. 2003 à déc. 2004**

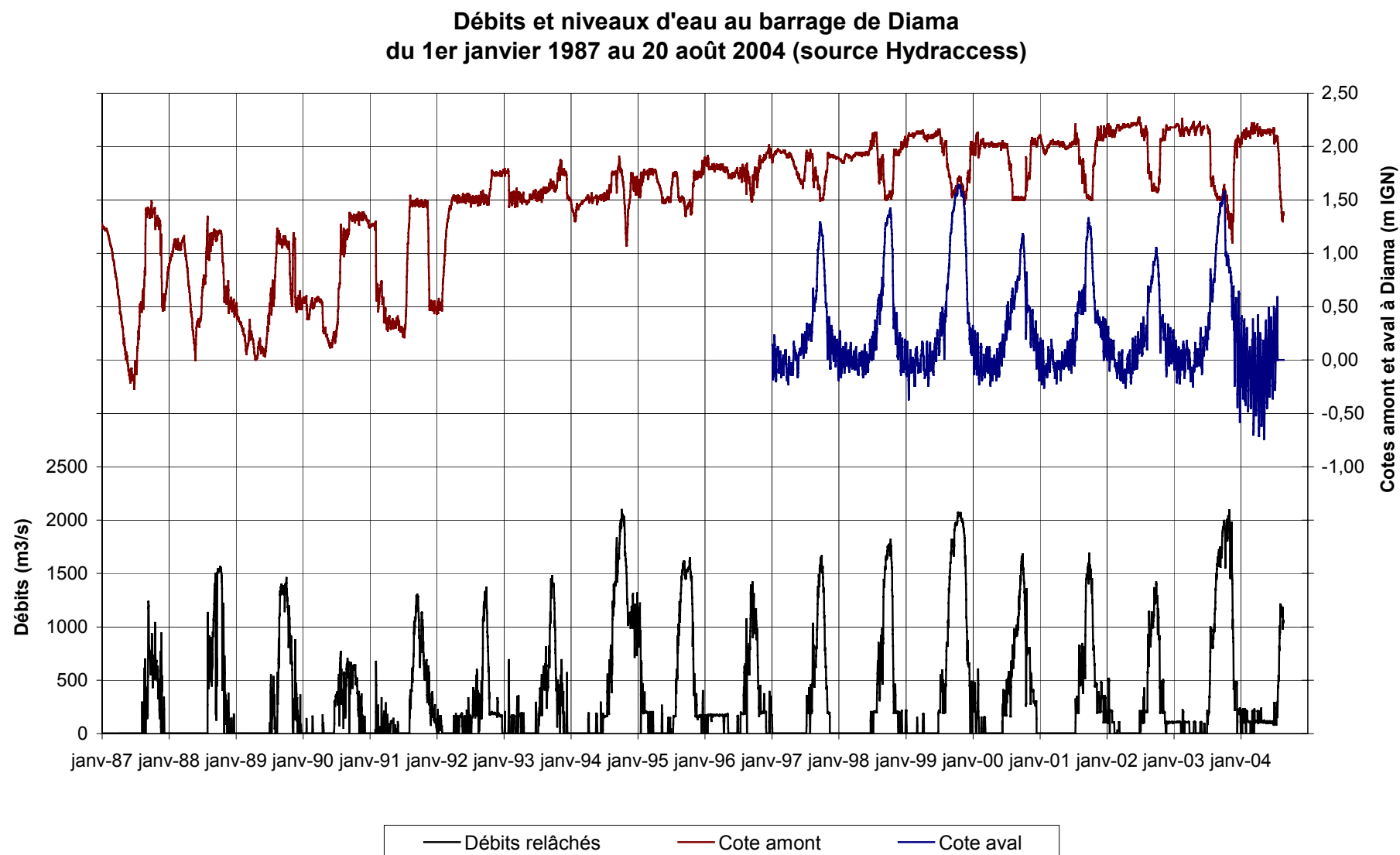


Figure 2.6. Débits relâchés au barrage de Dama, janv. 1987 à déc. 2004 (source Hydraccess)

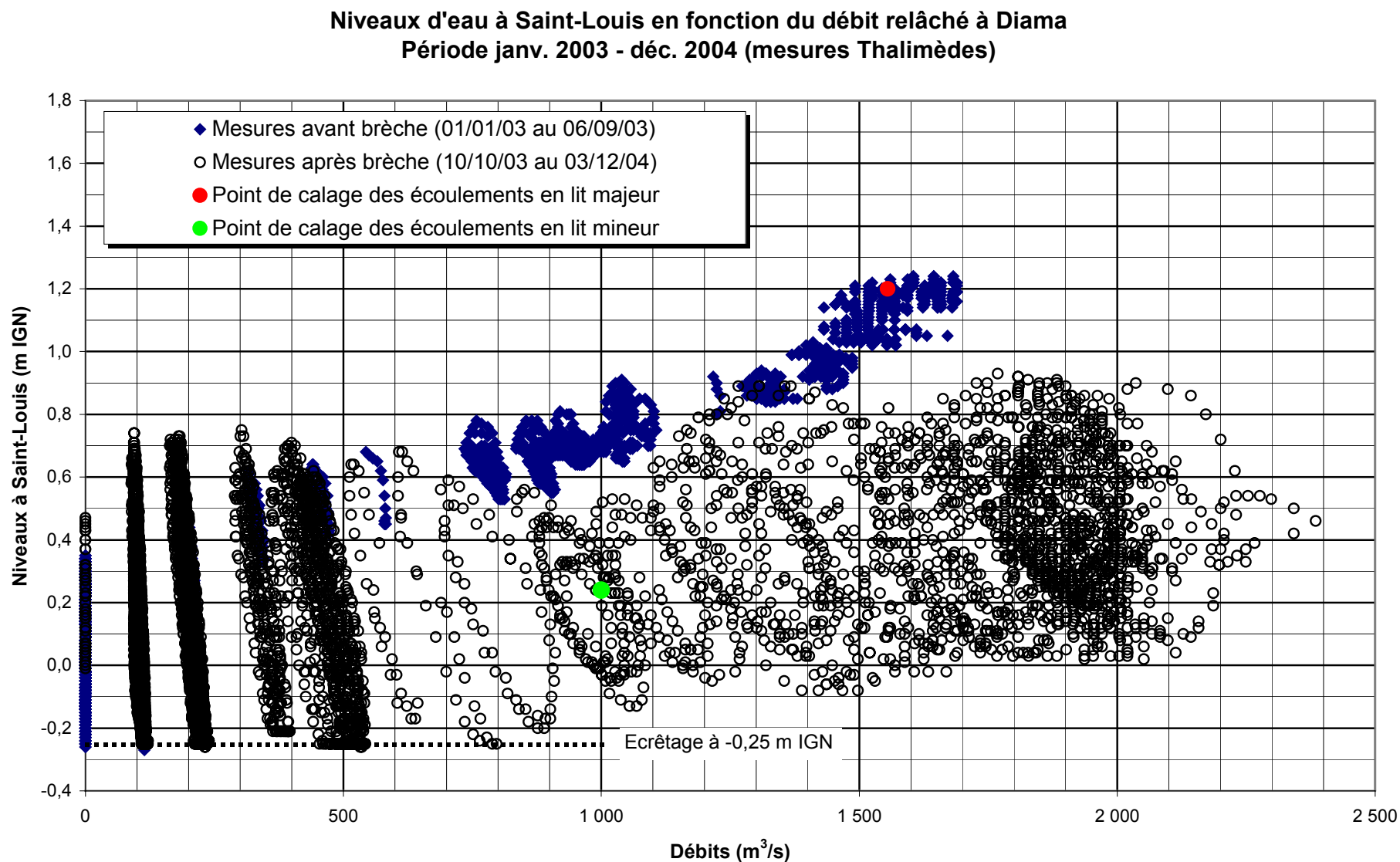


Figure 2.7 – Niveaux d'eau à St-Louis en fonction du débit relâché à Diama – Période janv. 2003 à déc. 2004 (mesures Thalimèdes)

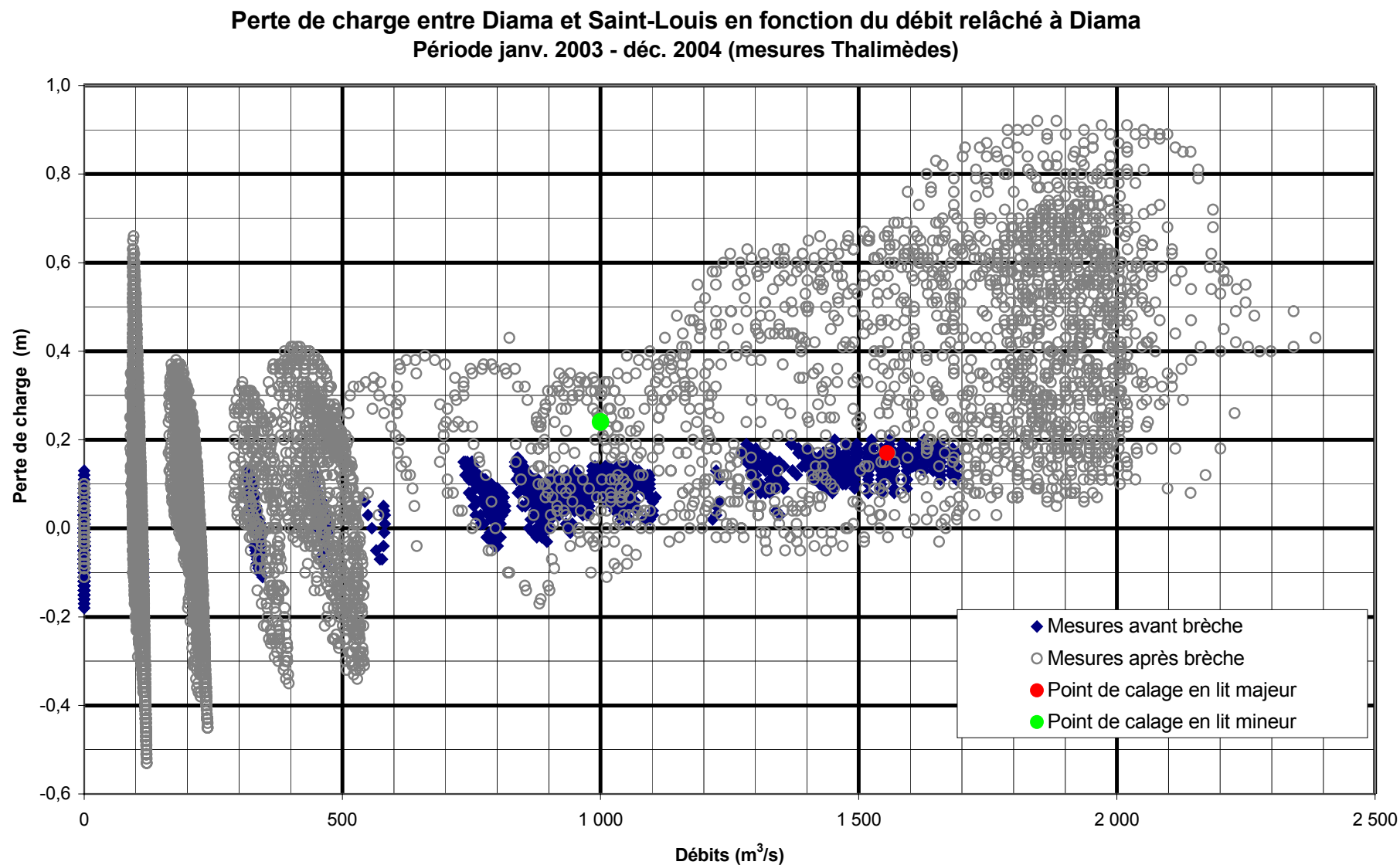


Figure 2.8. – Perte de charge entre Diama et St-Louis en fonction du débit relâché à Diama – Période janv. 2003 à déc. 2004 (mesures Thalimèdes)

**Extrapolation directe des mesures de niveaux d'eau à Saint-Louis en fonction du débit relâché à
Diamant après ouverture de la brèche - mesures Thalimèdes (oct. 2003 - déc. 2004)**

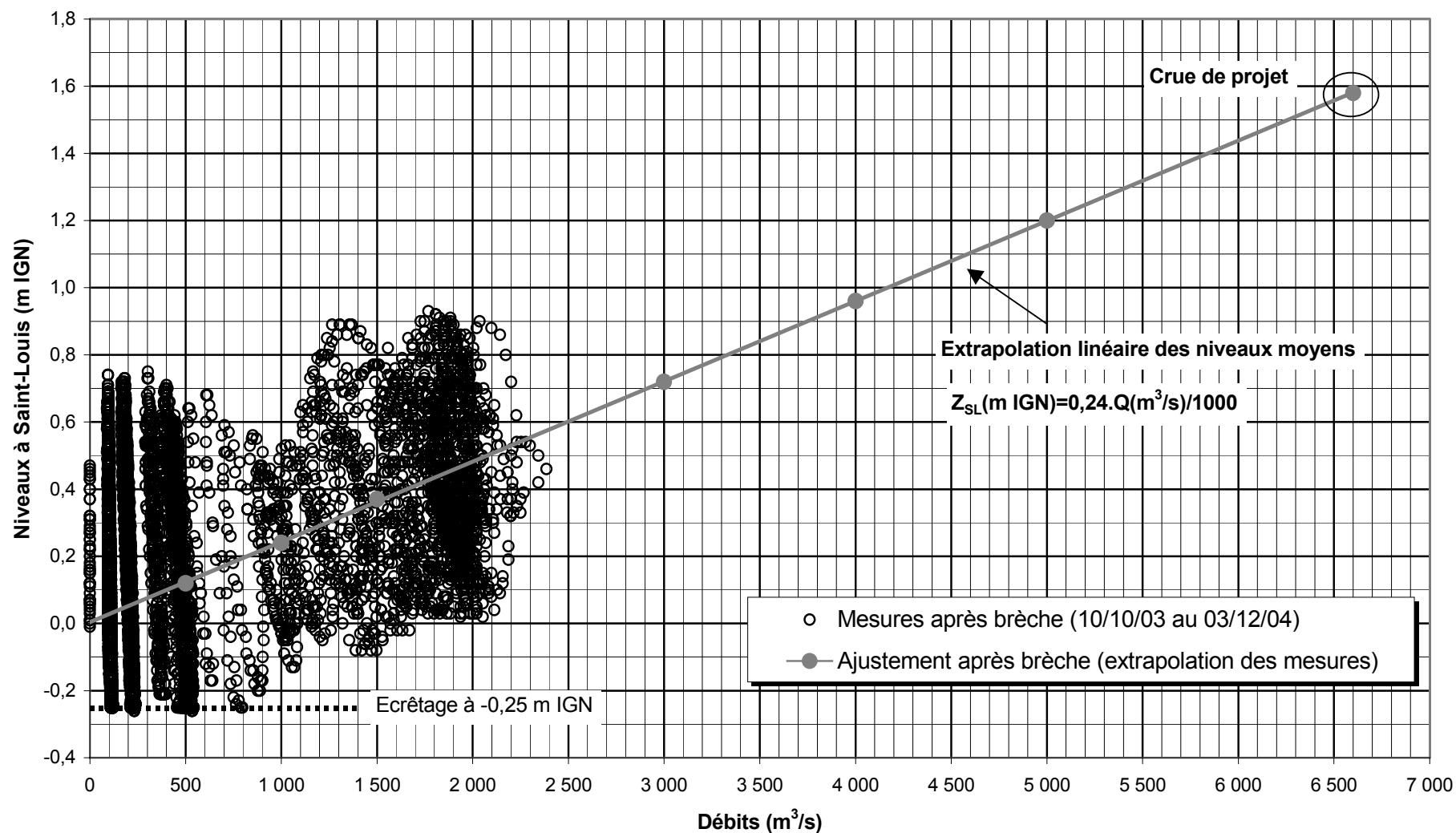


Figure 2.9. Extrapolation des ZSL jusqu'à Q Diamant égal à 6600 m^3/s

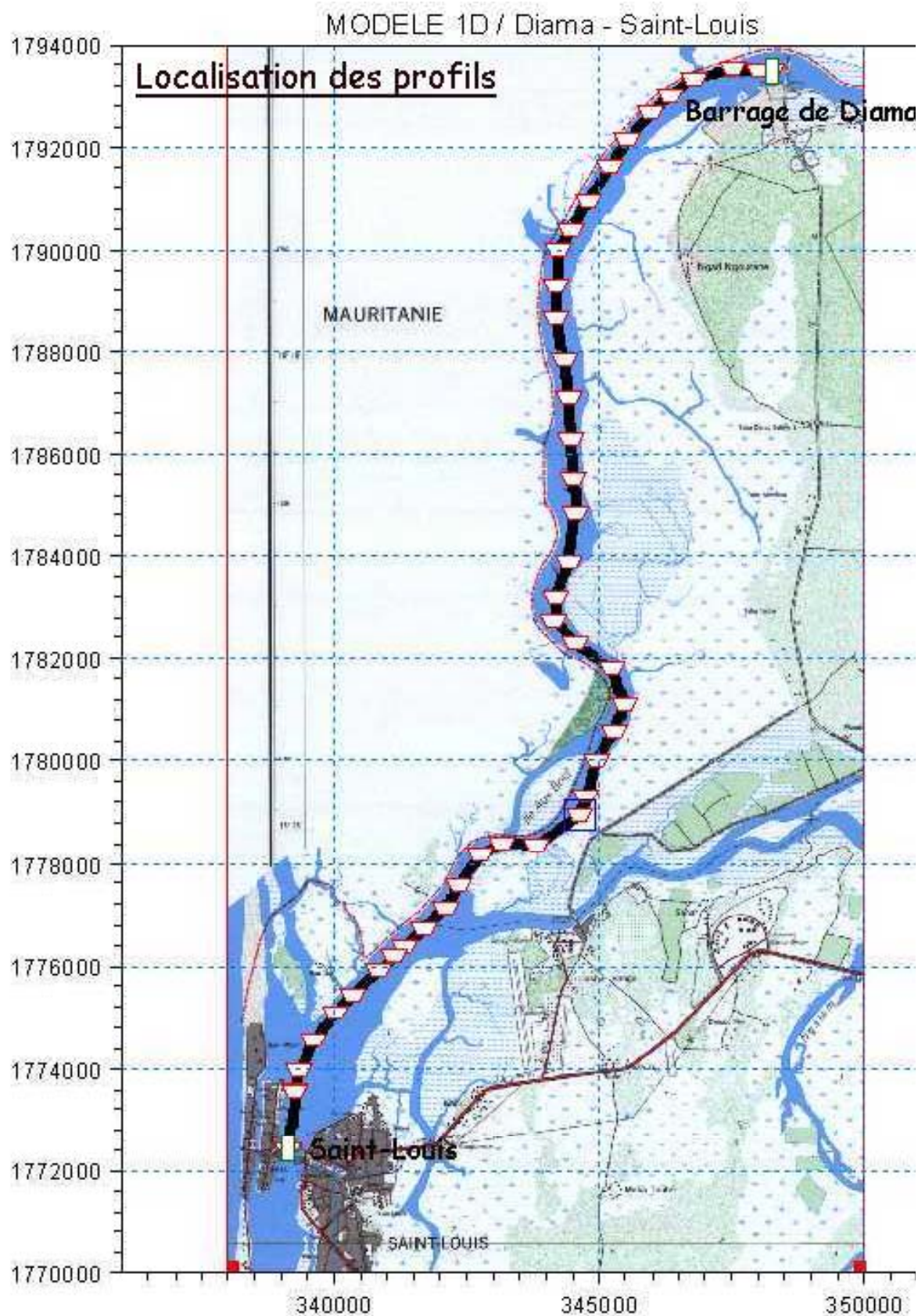


Figure 3-1 – Modèle 1D – Localisation des profils en travers

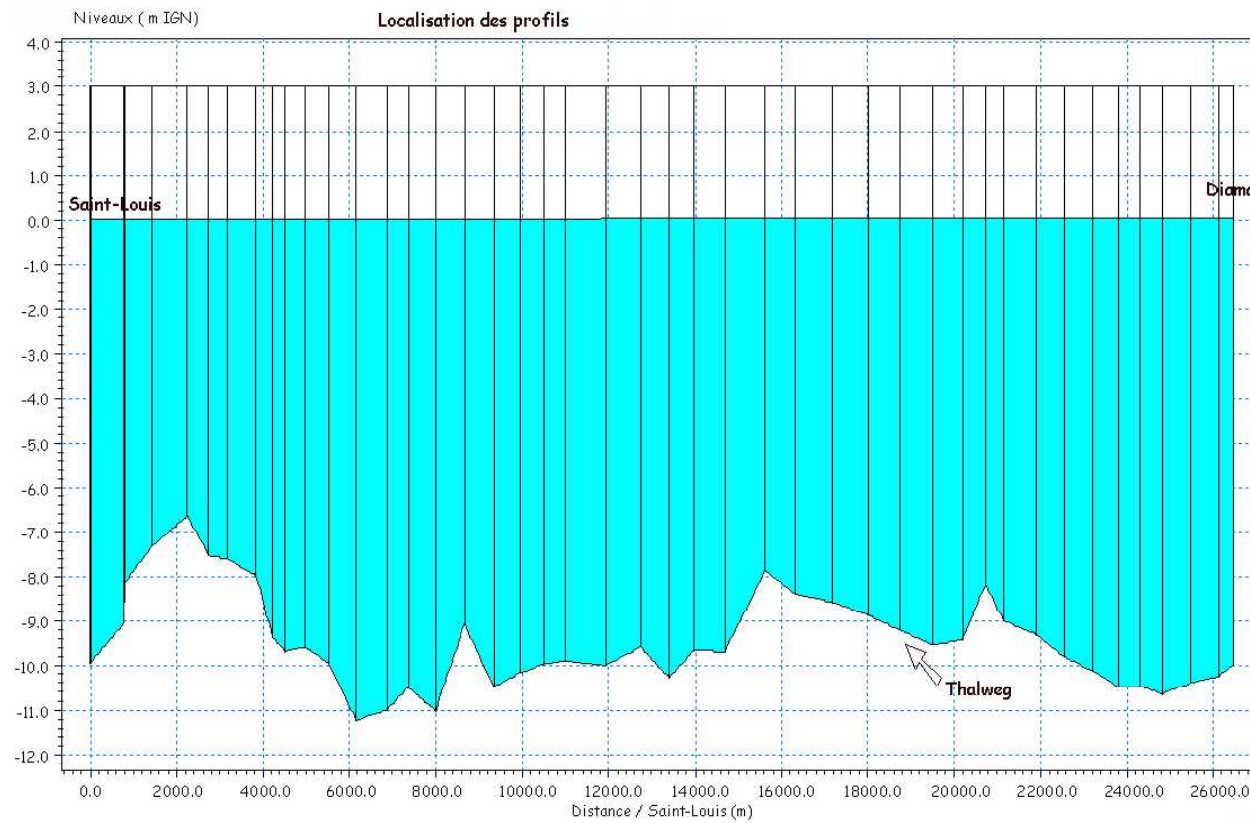


Figure 3-2 – Modèle 1D – Profil en long du fleuve Sénégal de Diama à Saint-Louis

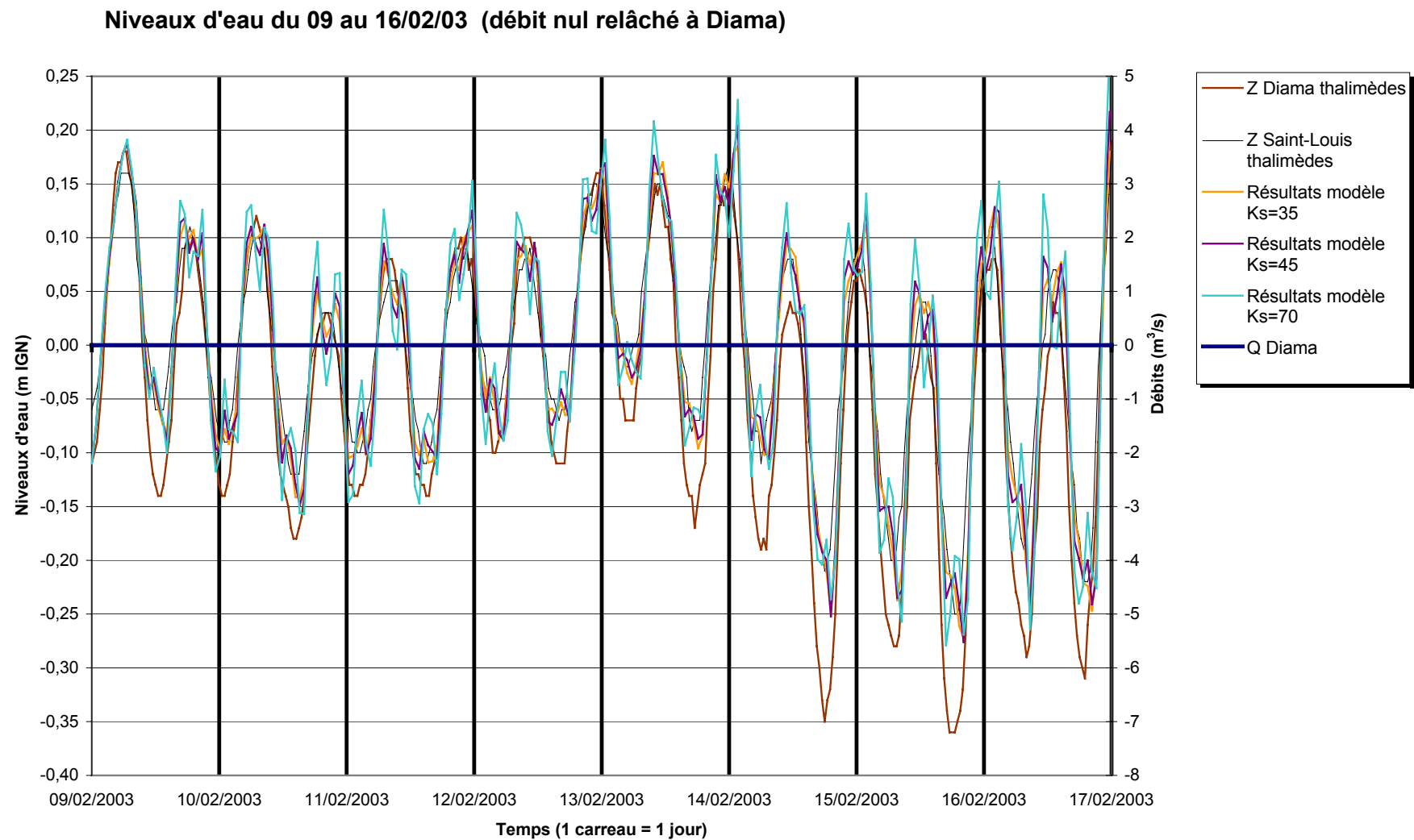


Figure 3-3 – Modèle 1D – Zdiama du 09 au 16.02.03 ($Q_{\text{moyen}} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$)

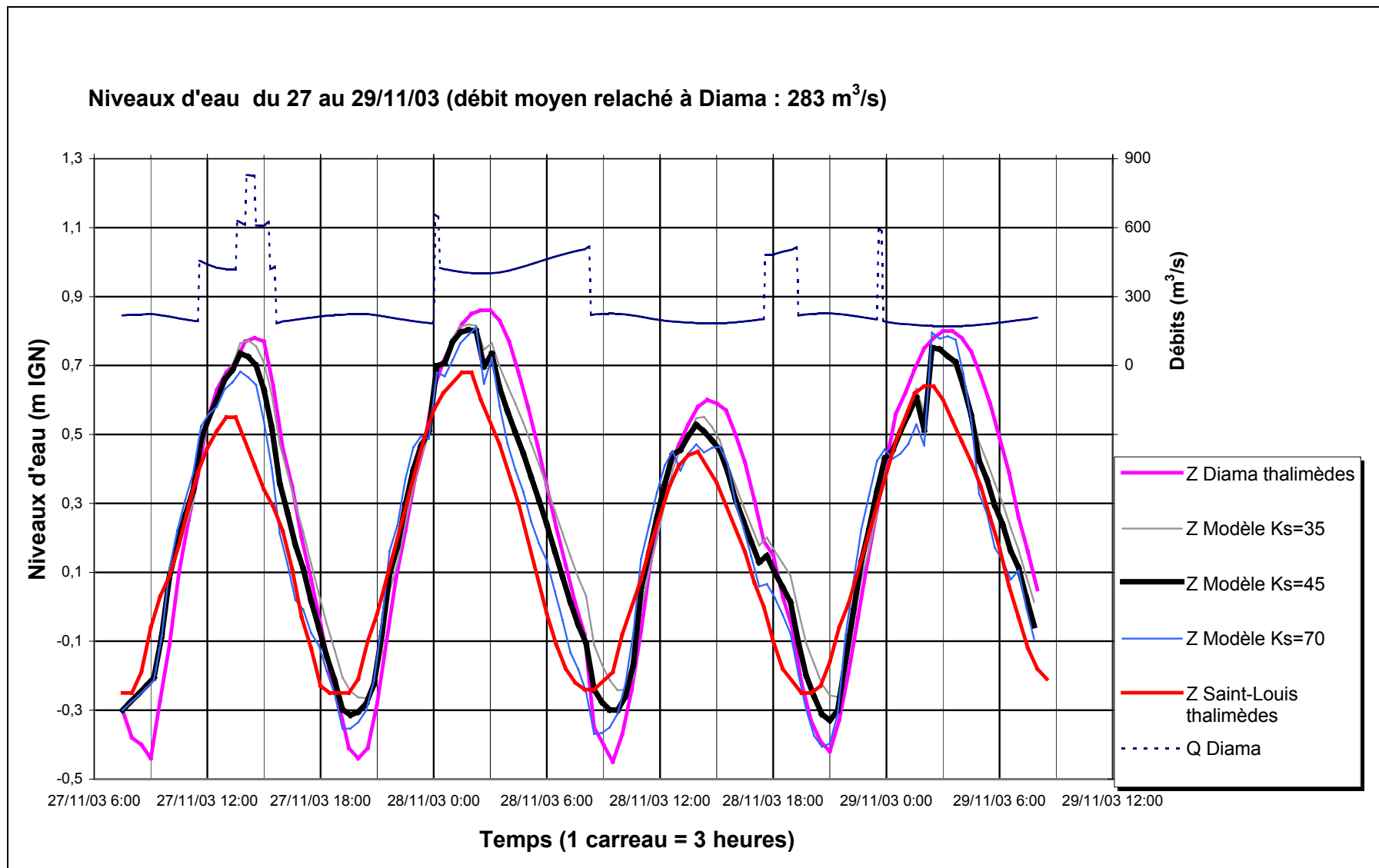


Figure 3-4 – Modèle 1D – Zdiama du 27 au 29.11.03 (Qmoyen = 283 m³/s)

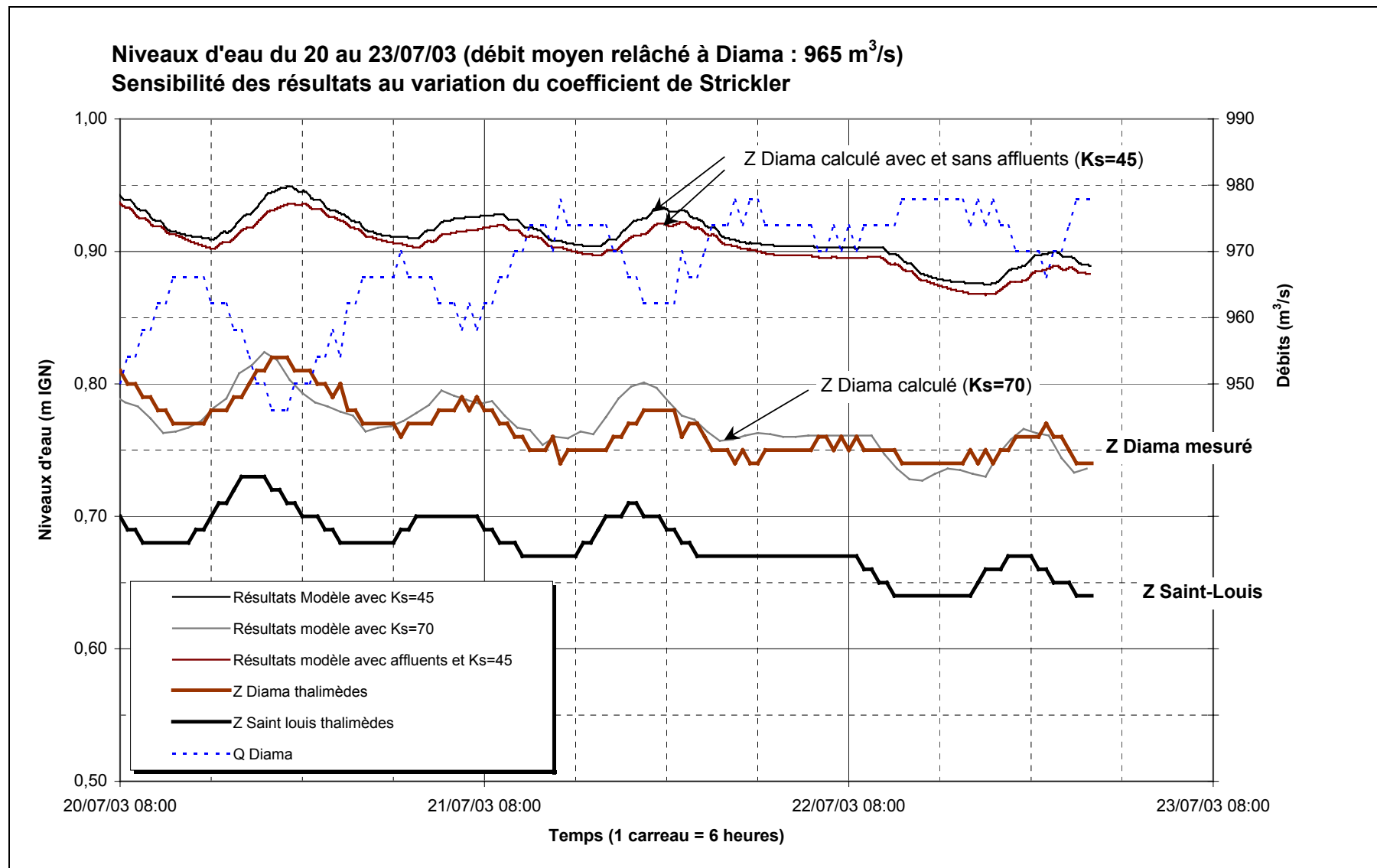


Figure 3-5 : Modèle 1D – Z_{Dama} du 20 au 23.07.03 (Q_{moyen} = 965 m³/s) – Sensibilité au Ks

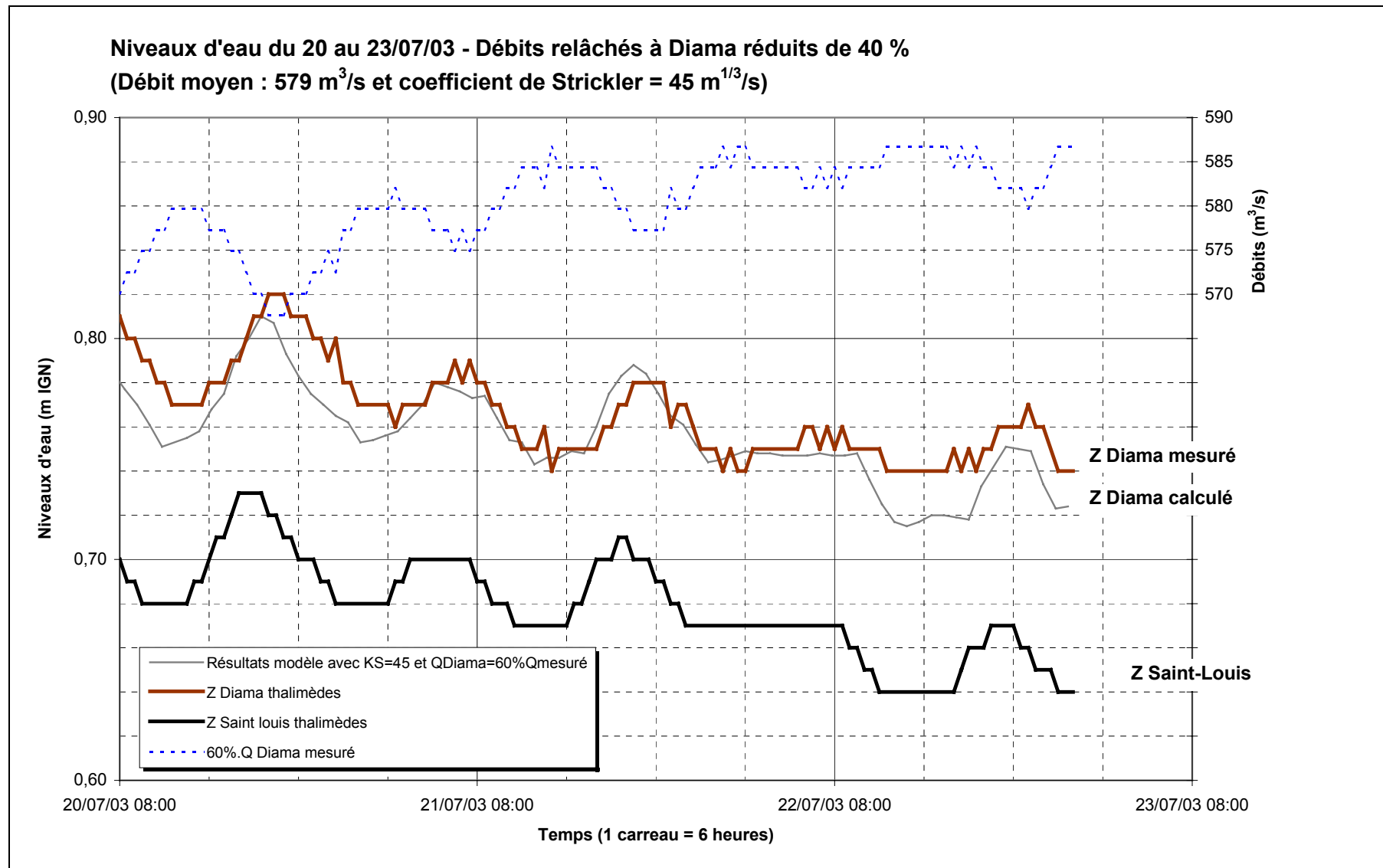


Figure3-6 - Modèle 1D - Z_{Diama} du 20 au 23/07/03 – Sensibilité à Q_{Diama}

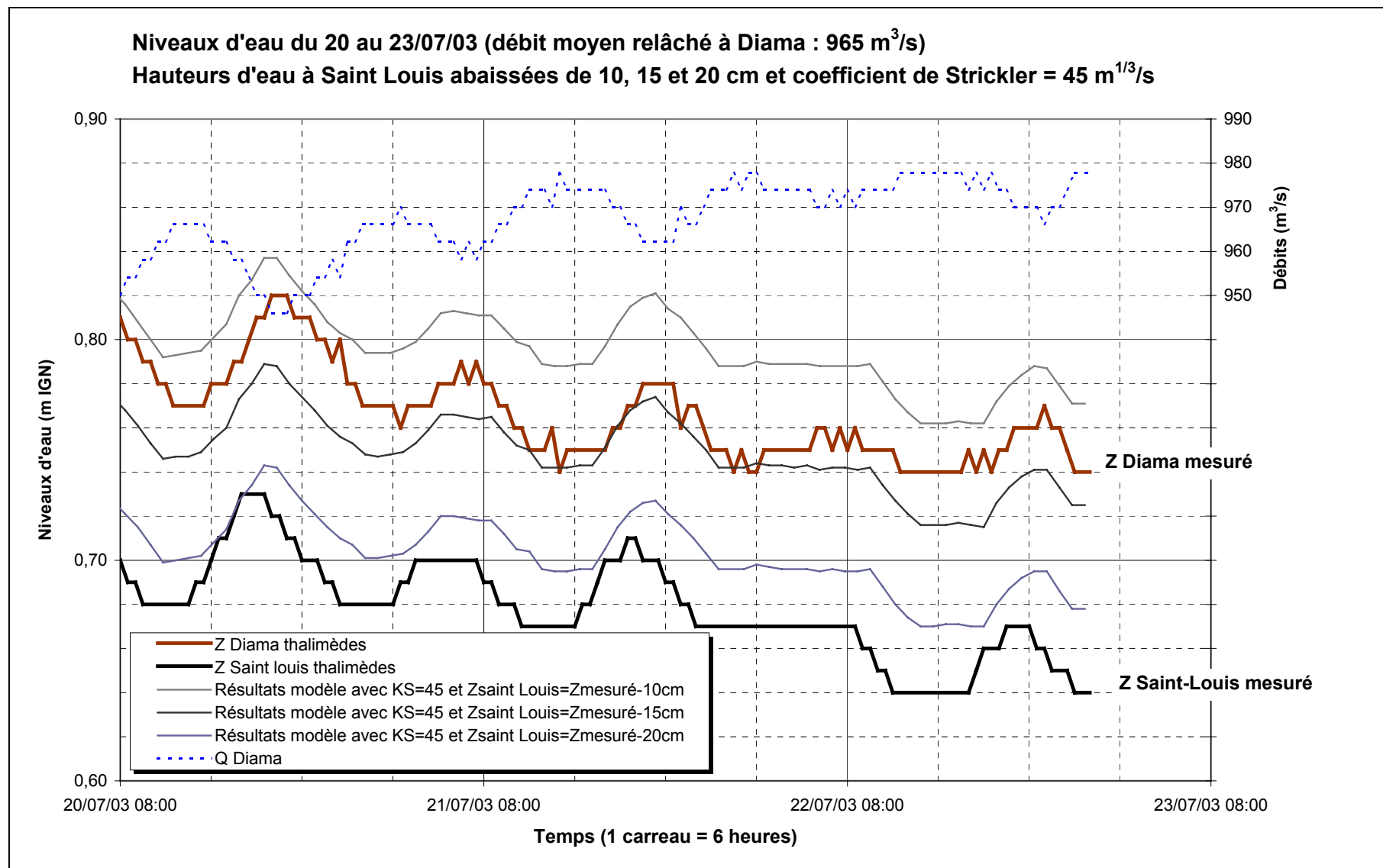


Figure 3-7 - Modèle 1D - Z_{Diama} du 20 au 23/07/03 (Q_{moyen} = 965 m³/s) – Sensibilité à Z_{SL}

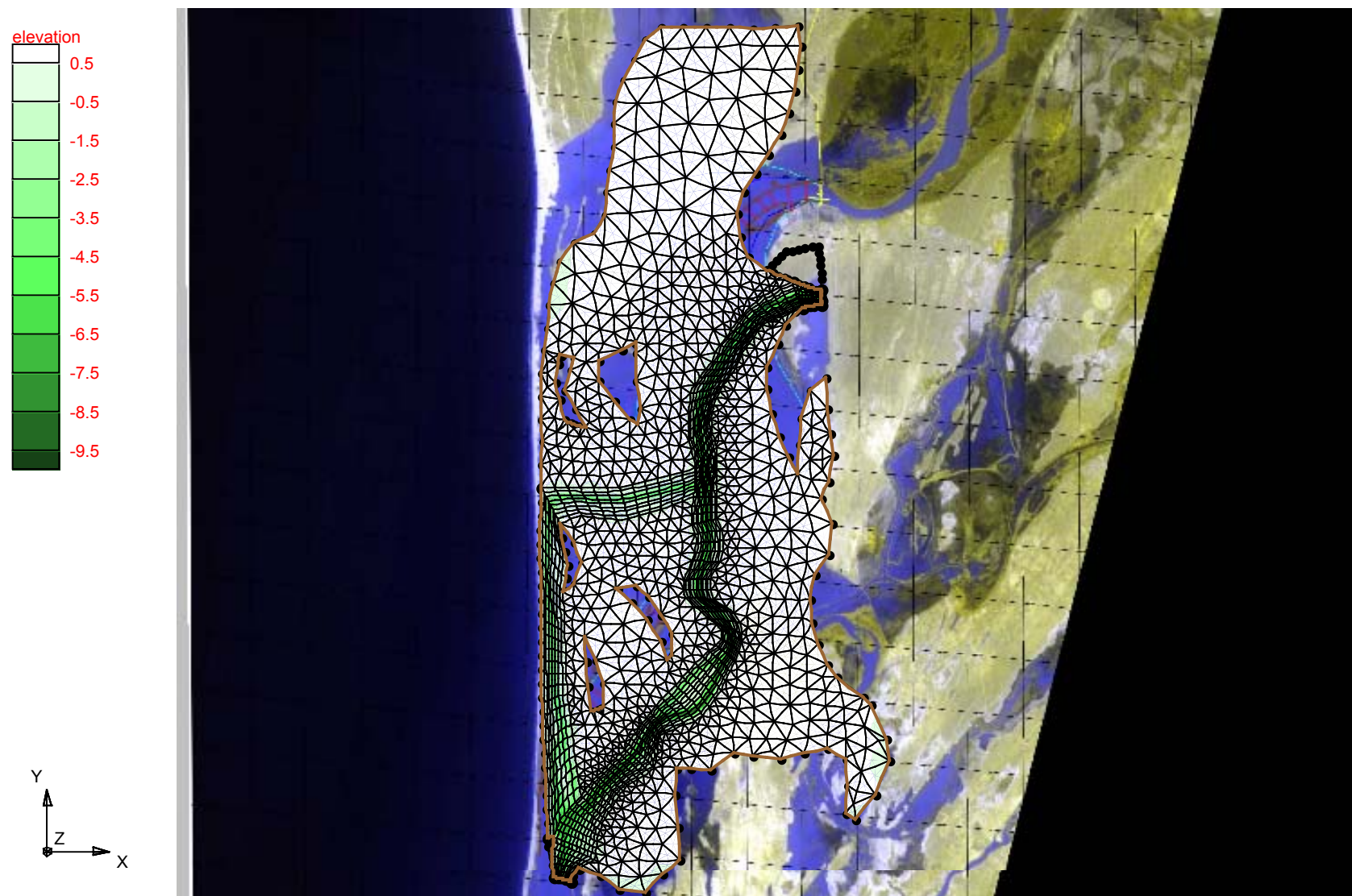


Figure 4-1 - Modèle 2D - Maillage et topographie de la zone d'étude

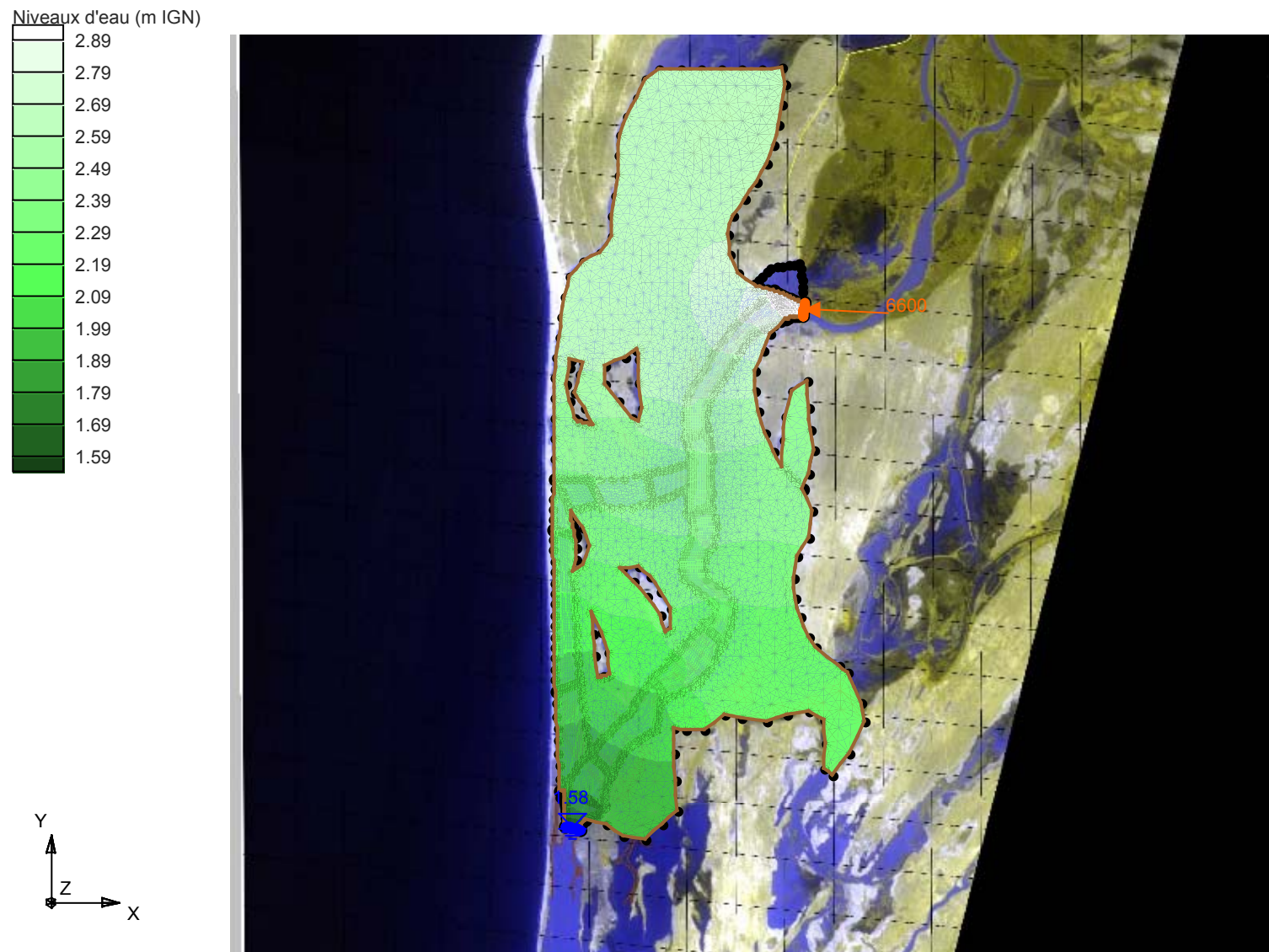


Figure 4-2 - Niveaux d'eau (m IGN) – Modèle 2D pour $Q = 6\,600\text{ m}^3/\text{s}$



Figure 4-3 - Vitesse (m/s) – Modèle 2D pour $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$

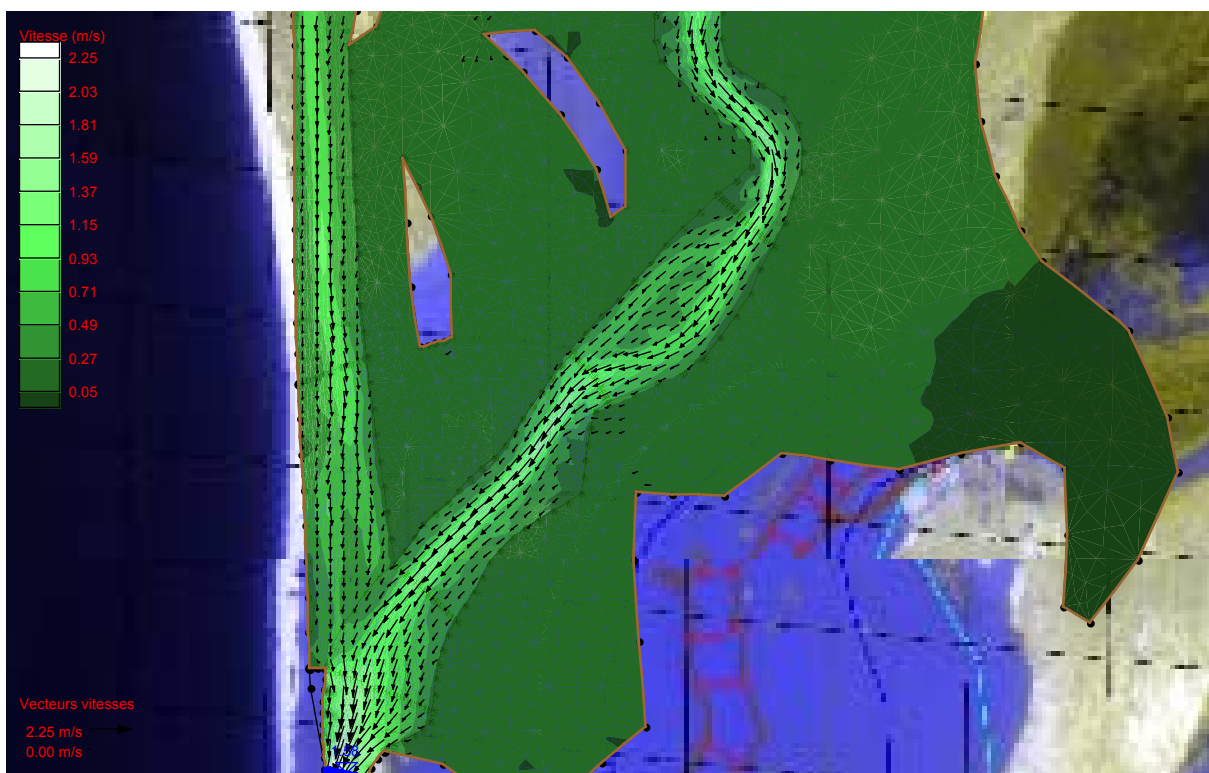
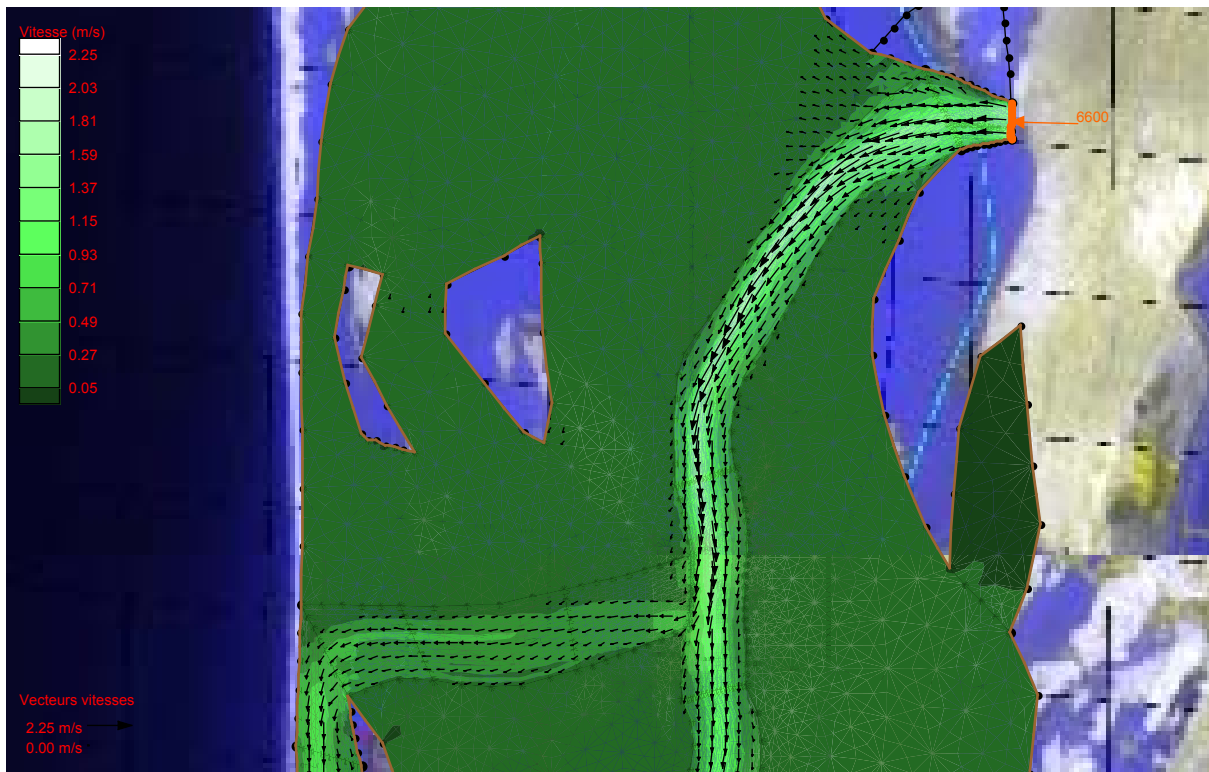


Figure 4-4 - Vecteurs vitesses – Modèle 2D pour $Q = 6\,600 \text{ m}^3/\text{s}$

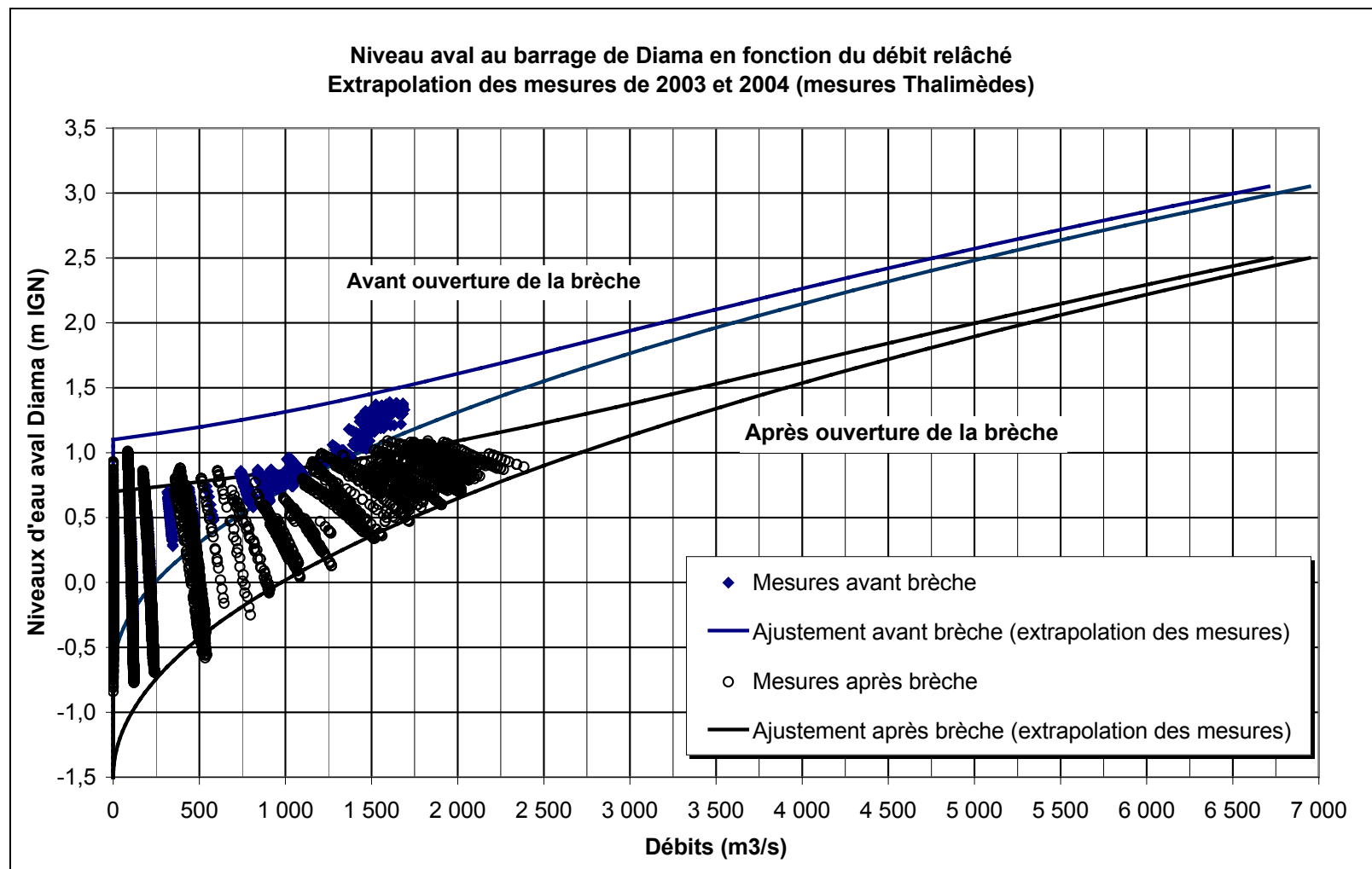
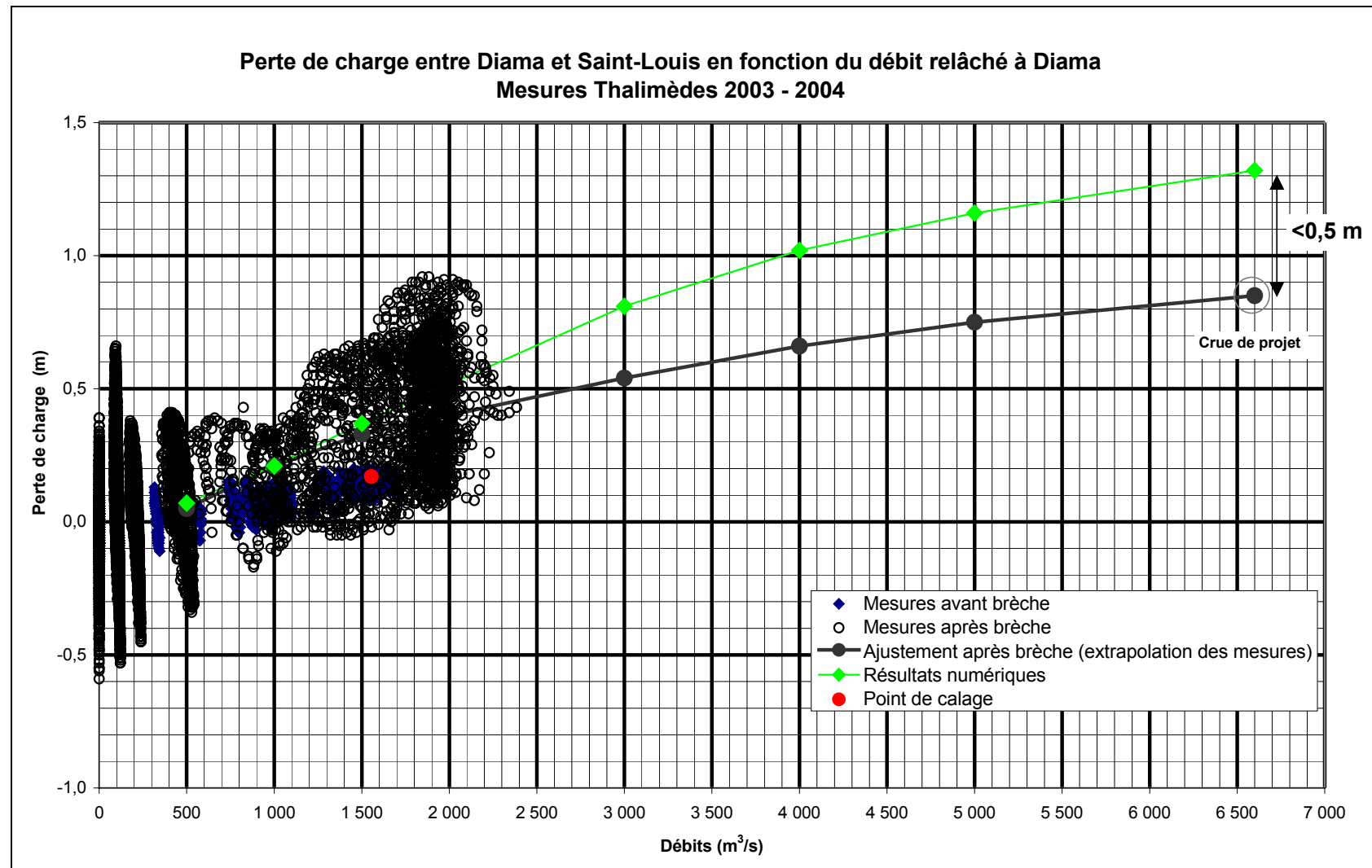
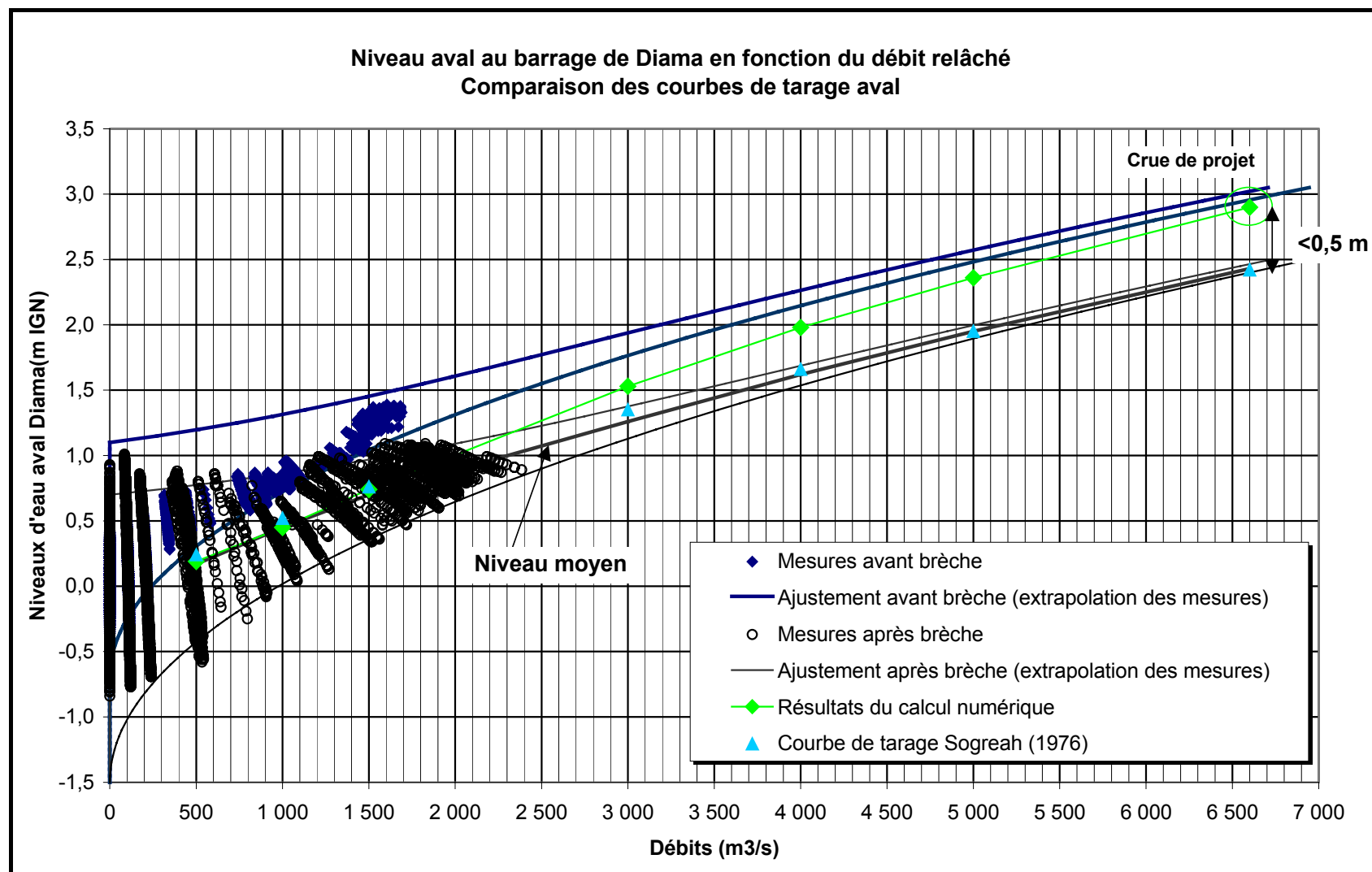


Figure 5-1 - Courbe de tarage aval de Dama – Extrapolation des mesures

**Figure 5-2 - Perte de charge entre Dama et Saint-Louis – Extrapolation des mesures**

**Figure 6-1 - Comparaison des courbes de tarage aval de Diama**

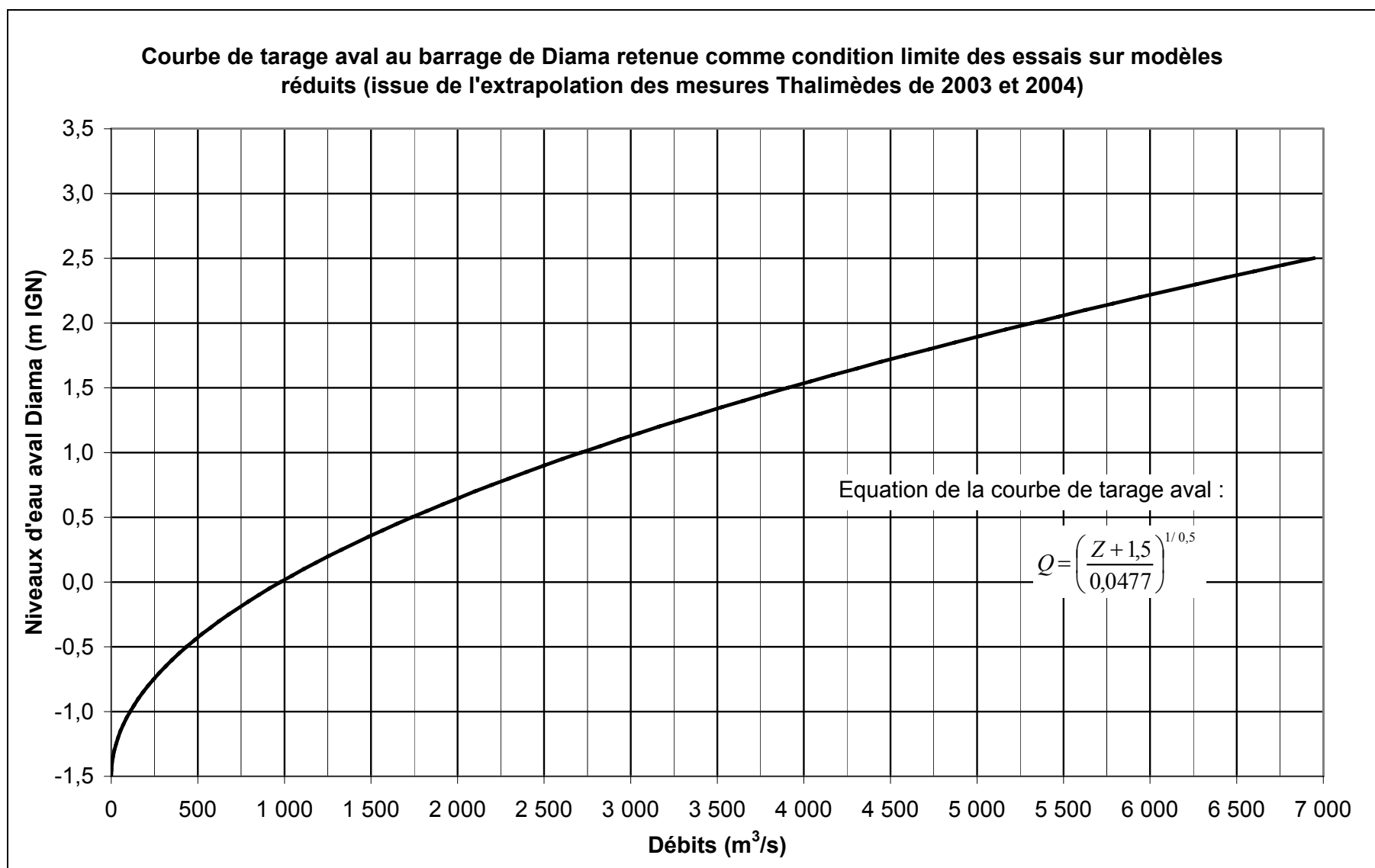


Figure 6-2 - Courbe de tarage aval de Dama retenue comme condition limite des essais sur modèles physiques